Approches psychologiques de situations de malentendu dans des activités de didactique des sciences

Understanding Misunderstandings in Science Education Activities : Integrating Psychological Approaches

T H È S E

présentée à l'institut de psychologie et éducation
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Neuchâtel

pour l'obtention du titre de
docteur ès sciences humaines et sociales
par

Alaric Kohler

acceptée sur proposition du Jury

Directrice de thèse

Anne-Nelly Perret-Clermont - Professeure émérite
Université de Neuchâtel

Rapporteur·e·s

Antonio Iannaccone - Professeur ordinaire
Université de Neuchâtel

Kristine Lund - Ingénieure de recherche, HDR
Directrice du Laboratoire d'Excellence ASLAN
ENS de Lyon et Université de Lyon II

Andrée Tiberghien - Directrice de recherche émérite CNRS
ENS de Lyon et Université de Lyon II

Annick Weil-Barais - Professeure émérite
Université d'Angers

Licence Creative Commons
BY - NC - SA



Alaric Kohler

SLOW SCIENCE

Je certifie sur l'honneur que cette recherche a été poursuivie le temps qu'il a fallu pour apporter une réponse à la question posée, et qu'elle n'a pas fait l'objet de compromis quant à ses résultats dans le but de respecter un délai de remise.

UNIVERSITÉ DE
NEUCHÂTEL

Faculté des Lettres et Sciences Humaines
Espace Tilo-Frey 1
CH - 2000 Neuchâtel
Tél : +41 (0)32 718 17 00
Fax : +41 (0)32 718 17 71
secretariat.lettres@unine.ch

IMPRIMATUR

La Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Neuchâtel, sur les rapports de Mme Anne-Nelly Perret-Clermont, directrice de thèse, professeure émérite, Université de Neuchâtel ; M. Antonio Iannaccone, professeur, Université de Neuchâtel ; Mme Kristine Lund, HDR, Directrice du Laboratoire d'Excellence ASLAN (Advanced Studies on Language Complexity), Ecole Normale Supérieure de Lyon et Université de Lyon II ; Mme Andrée Tiberghien, Directrice de recherche émérite CNRS, Ecole Normale Supérieure de Lyon et Université de Lyon II ; Mme Annick Weil-Barais, professeure émérite, Université d'Angers, autorise l'impression de la thèse présentée par M. Alaric Kohler en laissant à l'auteur la responsabilité des opinions énoncées.

Neuchâtel, le 30 novembre 2020

Le doyen
Pierre Alain Mariaux

Les poètes et les hommes de science ne se disputent que le rang.

(Jacques, 1985, p. 29)

Remerciements

À Anne-Nelly Perret-Clermont, pour son enseignement à la pensée critique, ses dialogues passionnants, et la liberté qu'elle m'a laissée dans mes recherches et - surtout - pour avoir veillé à mon éducation académique bien au-delà du sujet de la thèse, et cela malgré mon indiscipline récurrente et mes habitudes de philosophe. Enfin, je la remercie tout particulièrement d'avoir accordé sa confiance à un fils de mécanicien, lui permettant un travail de chercheur sur l'apprentissage de la mécanique où se rencontre les points de vue "manuel" et "intellectuel".

À Vittoria Cesari Lusso, pour ses cours intrépides en psychologie de la communication, à l'origine d'un questionnement qui n'a jamais cessé depuis.

À Andrée Tiberghien pour son accompagnement dès les débuts de mon travail et jusqu'au manuscrit final, et à qui je dois beaucoup de ma compréhension des enjeux de l'enseignement de la physique.

À Annick Weil-Barais, pour sa psychologie cognitive ouverte et critique, et pour m'avoir aidé efficacement à résoudre un défi majeur : la présentation de mon travail dans son rapport à l'interdisciplinarité.

À Bernard Chabloz, qui a rendu possible la conception du logiciel *Marbles Move* et qui, depuis lors, n'a cessé de m'enseigner la physique dans les corridors, au café, par e-dialogues, etc. - pour mon plus grand plaisir. Je le remercie aussi vivement pour sa relecture attentive.

À François Gremion, pour sa relecture du chapitre 2 qui m'a aidé à réfléchir au concept de *situation*, et pour m'avoir indiqué non seulement les problèmes que pose sa définition, mais aussi une littérature que j'ignorais, et l'importance de Dewey.

À Jean-Blaise Grize, pour le legs intellectuel rigoureux que constitue son travail académique, pour son ouverture au dialogue avec de jeunes chercheurs à un âge avancé, et pour m'avoir transmis son manuscrit annoté de l'essai de Milton Campos.

À Milton Campos, dont le passionnant essai *La Traversée* m'a permis de comprendre le potentiel de la théorie de la communication et de la logique naturelle de Grize pour la recherche en sciences humaines, ce qui fut un véritable déclic dans mes pérégrinations intellectuelles.

À Jaan Valsiner pour m'avoir encouragé à publier lors de l'un de ces (nombreux) moments de désespoir rencontrés dans l'élaboration d'une thèse.

À Gérard Vergnaud, pour m'avoir invité à garder les pieds sur terre malgré mes investigations philosophiques, que ce soit lors de nos échanges ou par ses conférences et écrits.

À Felice Carugati pour avoir pris le temps d'examiner et discuter les traces empiriques en détail, une aide aussi précieuse que rare.

À tous les excellents collègues de l'Institut de psychologie et éducation pour la bonne ambiance et leur amitié, et tout particulièrement Sheila Padiglia et Yannick Dascoli pour m'avoir dépanné lorsque je devais être à deux endroits en même temps.

À tous les visiteurs de l'Institut de psychologie et éducation qui m'ont accordé du temps et qui ont contribué à m'aider ou à m'encourager à poursuivre mon travail, notamment : Aleksander Baucal, Michael Baker, Ralph Balez, Margarida Cesar, Jean-Pierre Deconchy, Christian Plantin, Eddo Rigotti, Alain Trognon & Laurent Veillard.

À tous les étudiants et auditeurs de mes cours et exposés de ma thèse, qui ont participé à leur manière à améliorer sa communication, et en particulier à Olivier Simon pour les corrections spontanément offertes lors de mes cours HEP de mes écritures de physique amateure sur mes diapositives de cours.

Aux enseignants et élèves ayant participé à la recherche et au directeur de l'établissement, pour avoir accueilli mon regard de chercheur sur leur monde scolaire, et à Philippe Drompt, tout particulièrement, pour m'avoir donné confiance en la possibilité de comprendre la physique quand j'étais gymnasien : j'aurai finalement poursuivi l'exercice bien au-delà de ces quelques années...

À mes amis, enfin, qui ont si souvent pris des nouvelles et m'ont si souvent entendu dire qu'elle était presque finie, et tout particulièrement à Swenn Calderara pour m'avoir fait découvrir *linux*, et à Florian Champion pour m'avoir initié aux outils d'édition LateX sans lesquels la rédaction de ce travail serait devenue un enfer technique à chaque nouvelle version des logiciels.

À mon père, mécanicien professionnel et bricoleur intempestif, qui m'a appris l'inestimable valeur de faire les choses soi-même pour comprendre.

Et à mon fils, pour toutes les fois où j'ai dû dire : "- Non je ne peux pas jouer, je dois travailler". [1]

1. Cette thèse n'a pas fait l'objet d'un financement externe, et a été effectuée essentiellement sur mon temps libre.

Avertissement

Le choix de l'usage grammatical du masculin pour les termes généraux ou les pluriels se justifie uniquement dans le but d'alléger un texte qui exige déjà de nombreuses inférences de la part des lectrices, et des lecteurs, en raison de son propos et d'un système de signes étendu au langage mathématique et à la logique naturelle.

En outre, j'utilise quelques conventions supplémentaires, décrites ci-dessous.

Le texte en italique connote un usage conceptuel du ou des terme(s) écrit(s) mais, dans le but d'alléger la lecture, je ne l'utilise systématiquement que dans les cas où il pourrait y avoir une ambiguïté quant à cet usage, notamment quand les mêmes termes font aussi partie des usages courants de la langue (comme *force* ou *malentendu*), ou quand je fais également un usage courant des termes linguistiques par endroits, pour diverses raisons. En outre, l'italique est utilisé pour la désignation du terme linguistique plutôt que son référent, et pour les locutions latines et les titres d'ouvrage, selon la coutume.

Le texte entre guillemets connote ma prise de distance avec les propos écrits (comme lorsque j'utilise "préconception" sans prendre en charge l'énonciation qu'il s'agit bien dans ce cas d'une *préconception*) ou, selon les usages courants, désigne le discours d'un autre énonciateur : les mots utilisés par les élèves, issus des transcriptions, ou le texte d'auteurs que je cite.

Avant-propos

Au cours de la réalisation de cette thèse, il s'est avéré grâce au colloque réunissant le jury, que mon projet initial de recherche était de plus grande ampleur que je ne l'avais initialement envisagé. C'est pourquoi, je précise dans cet avant-propos en quoi consiste le projet de recherche dans son ensemble, et quelle est la partie qui constitue la thèse soumise à l'évaluation du jury.

L'objectif initial de la recherche consistait à élaborer une méthodologie qui permette de prendre en considération les processus socio-cognitifs situés dans le contexte des activités scolaires, à partir de l'étude approfondie de quelques difficultés que rencontrent les élèves dans leur apprentissage de la physique.

Ce faisant, j'ai été amené à emprunter des concepts de plusieurs courants de recherche en sciences humaines, et à les intégrer dans un cadre théorique cohérent et spécifique aux besoins de ma recherche. Afin d'éviter les emprunts superficiels à des champs théoriques ou épistémologiques différents, qui détourneraient leur sens original, j'ai veillé à la compatibilité des concepts choisis et des courants de recherche invoqués, et je présente explicitement ce travail dans la première partie de la thèse.

La (longue) partie théorique des trois premiers chapitres est par conséquent un outil indispensable à la compréhension des résultats empiriques qui sont présentés : elle sert à conduire des analyses permettant de distinguer les conceptions erronées des élèves d'éventuelles *situations de malentendu*. L'attention portée, dans la problématique, au problème de l'échelle d'observation du phénomène étudié m'a conduit à concevoir une démarche pour l'identification et l'analyse des *situations de malentendu*, qui coordonne notamment des emprunts à la psychologie socio-génétique, à la pragmatique conversationnelle et à la logique naturelle.

Le recueil des traces des activités des élèves en classe de physique s'est opéré au sein d'un projet de recherche européen ESCALATE, dont la description au chapitre 4 est nécessaire à la mise en contexte de ces activités. Plus particulièrement, ce chapitre permet d'exposer la réflexion pédagogique et didactique qui est à l'origine de la séquence d'enseignement et des activités d'apprentissage étudiées. Ces dernières forment donc le contexte des analyses des situations de malentendu que je présente ici.

Les résultats comportent une collection d'études de cas réalisées sur ce même corpus de traces. Des sept situations de malentendu analysées, quatre d'entre elles (les situations #3 à #6) ont été reléguées en annexe dans la version soumise en vue de la soutenance, afin de réduire un peu le longueur de la thèse. À la demande unanime du jury lors de la soutenance, ces quatre situations sont réintégrées dans le corps du texte dans la présente version, sans autre modification que les corrections d'usage.

Les sept analyses concernent diverses pratiques :

1. Une situation concerne un exercice individuel sur le polycopié de cours, une tâche scolaire traditionnelle.

2-4 Trois situations portent sur autant d'items du questionnaire conçus par l'enseignant pour évoquer des "préconceptions" auprès des élèves, questionnaire auquel les élèves travaillent d'abord individuellement, puis reprennent dans des travaux de groupe.

5-6 Deux situations portent sur des conversations orales entre élèves, et avec l'enseignant, qui ont lieu pendant les leçons.

7 Une situation concerne la pratique nommée "dessin des forces" dans cette classe, qui est transversale à plusieurs tâches.

Résumé

Cette recherche porte sur l'apprentissage de la physique newtonienne en milieu scolaire, et plus spécifiquement au niveau des observations empiriques sur l'apprentissage de la physique newtonienne. Après un brève présentation des difficultés de la perspective focalisée sur les conceptions individuelles des élèves, elle propose une théorisation de l'apprentissage en tant que processus multi-dimensionnel, où les *cheminements de pensée* des élèves et de l'enseignant ne peuvent se comprendre que relativement à des processus communicationnels et sociaux déployés dans la classe, et à des processus historiques, culturels et sémiotiques constitutifs des savoirs enseignés. Ces processus sont mis en évidence à l'occasion d'incidents critiques : des *situations de malentendu*, qui fournissent une explication alternative ou complémentaire à l'attribution des difficultés des élèves à leurs propres *conceptions*, couramment utilisée dans la littérature.

Pour aborder l'apprentissage des sciences à travers des *situations de malentendu*, cette recherche coordonne plusieurs approches théoriques issues de recherches en psychologie, sciences du langage et de la communication, sémiologie et didactique des sciences. Ces approches sont coordonnées dans une théorisation intégrative [2], basée sur une épistémologie perspectiviste, mais sans en faire une *théorie générale* : la coordination des approches théoriques s'effectue à l'occasion de la recherche singulière présentée, comme la théorisation scientifique d'un cas particulier que toutes les perspectives évoquées participent à élucider.

Par la construction et la mise en œuvre d'une séquence didactique basée sur l'argumentation entre élèves et l'expérimentation, cette recherche crée une situation d'apprentissage particulière dans une classe de lycée en laboratoire de physique. La dimension expérimentale et les échanges argumentatifs sont tous deux renforcés par la mise à disposition d'outils des nouvelles technologies, et par l'organisation du travail en petits groupes d'élèves. Cette situation permet d'analyser dans sa complexité les activités d'une classe pendant un semestre, notamment parce qu'elle favorise la production d'échanges entre les élèves et fournit ainsi des traces pour étudier leurs *cheminements de pensée*.

Ce travail ne vise donc pas une *généralisation* de l'influence de quelques variables sur l'apprentissage ou la tendance à voir des malentendus émerger en classe, mais cherche à construire un regard nouveau sur des problèmes anciens et robustes, et propose notamment une redéfinition du problème des conceptions des élèves et de leur évaluation à partir de réponses souvent très lacunaires et ambiguës. Poser le problème des *situations de malentendu* dans des activités didactiques est une manière de mettre sur pied d'égalité élèves et enseignants, pris comme interlocuteurs au cours de processus complexes de communication et de pensée dont les ratés ne peuvent rarement être attribués à l'un ou à l'autre *individu* sans les simplifier outre mesure.

2. Ce terme fait surtout référence ici à l'intention d'une coordination explicite entre les perspectives utilisées, et au soin apporté à leur choix dans le but d'assurer une cohérence à l'ensemble et une compatibilité épistémologique entre toutes les perspectives articulées.

La contribution scientifique de cette thèse repose sur cette théorisation intégrée d'un phénomène complexe, et comprend l'élaboration d'une démarche d'analyse des *situations de malentendu* permettant d'assurer la continuité, dans le discours produit par le chercheur, des réflexions théoriques aux traces analysées, et vice versa. Chaque analyse de situation de malentendu constitue une enquête particulière. Ces enquêtes se focalisent sur trois échelons d'observation : (1) la construction du sens selon les divers points de vue d'élèves ou de l'enseignant, (2) les interactions, permettant d'aborder les processus sociaux de construction de sens qui émergent des échanges, et (3) la situation d'interlocution, permettant d'aborder chaque situation de malentendu dans sa singularité et de disposer d'un *référentiel* pour décider quant aux divergences entre les points de vue.

Cela permet au chercheur d'aborder les significations sans forcément les attribuer à un individu, de reconstruire la manière dont elles circulent dans la classe au fil de la séquence, et de faire des hypothèses sur le sens qu'elles prennent du point de vue de l'enseignant ou d'élèves spécifiques à des moments particuliers. Cela permet au chercheur de discuter des points de vue des élèves et de l'enseignant relativement aux connaissances de mécanique classique sans devoir les juger "vraies" ou "fausses". Les résultats montrent que certaines difficultés des élèves à interpréter la mécanique classique remontent à des malentendus lors de son élaboration au cours de l'histoire, ou à des difficultés également rencontrées par les auteurs des théories enseignées.

Mots-clefs

apprentissage, approche clinique, argumentation, communication, complexité, concept, intersubjectivité, perspective, préconception, raisonnement, didactique des sciences, sémiotique, situation de malentendu.

Summary

This research draws from empirical observations of newtonian physics teaching and learning activities at school, to propose a theorization of learning as a multi-dimensional process. In order to overcome known issues with research perspectives focusing on student's individual conceptions, it takes into consideration the student's own *pathway of thinking* (*cheminement de pensée*) relatively to communicative and social processes situated within its ecological context, and relatively to historical, cultural and semiotic processes, which are constitutive of the knowledge being taught.

Such processes are brought to light with the analysis of critical incidents, emerging from the class activities in its ecological context, for each of which an investigation is carried out in order to decide wherever there is, or is not, a situation of misunderstanding, that could provide an explanation for students' difficulties in learning, alternative or complementary to explanations in terms of individual misconceptions frequently used in literature.

In order to investigate *situations of misunderstanding* during science learning, several theoretical frameworks are coordinated, taken from psychology, communication sciences, language studies, semiology and educational sciences. The integrative [3] approach is funded on a perspectivist epistemology, without any claim to a *general theory* of learning : the coordination of the various theoretical frameworks is made for the singular research presented here, as the scientific theorization of a particular case.

The students' activities under study constitutes a particular case, at least for resulting from the implementation of a teaching sequence aiming at classroom discussion, argumentation, and inquiry learning. These pedagogical objectives are supported by the use of specifically designed tools in information and communication technology (ICT), and by the social organisation of the classroom activities into small groups of students, regulated exchange among peers, etc. These specific features of the teaching sequence allow for studying learning with an innovative teaching sequence and in the complexity of its natural environment, notably thanks to the high production of verbal interactions among peers, which are providing the empirical traces for microscale scrutiny of the students learning processes.

The research results do not aim at generalizing the influence of any specific variable on learning, nor the tendency to have more or less frequently *situations of misunderstanding* emerging ; Rather, it proposes a new outlook on old and sturdy issues, notably a new interpretation for (some) issues so far addressed in literature as the problem of students *own conceptions*, which are here considered as *constructed during the actual school activity* and through the hasty evaluation made by teachers, when interpreting the all too short answers provided by students, most often ambiguous. Addressing the issue of *situation of misunderstanding* in teaching and learning activities, allows to set students and teachers on equal ground, and lead to consider

3. This term most importantly refers here to the intention of an explicit coordination of the selected perspectives, and to the care taken in the coherence of both the selection and the epistemological compatibility of the related perspectives.

the complex communication and thought processes all interlocutors are involved in, of which the occasional failures cannot be easily attributed to one or the other *individual* without oversimplifying it.

Hence, the scientific contribution of this philosophical dissertation rests on the integrated theorization of a complex phenomena, and includes the elaboration of a method of analysis of *situations of misunderstanding* allowing a continuity, in the discourse produced by the researcher, from the theoretical discussion to the empirical observations, and vice versa. Each analysis of a *situation of misunderstanding* constitutes a specific inquiry.

Such inquiries are focusing on three levels of observation : (1) the meaning making from each of the various points of view involved, be it from students or teachers, (2) the interactions, which allows to approach social processes in the meaning making, such as it emerges from the actual interactions, and (3) the interlocutary situation, which allows to study each situation of misunderstanding in its own singularity, as in case studies, and provides a *referential* in order to decide, during the analysis of meaning making, wherever there is - or not - some divergence between various points of view.

Analysis on multi-levels allow the researcher to approach meaning without having to attribute it to a specific individual, to reconstruct the way such meaning may flow throughout the sequence, and to make hypotheses on the singular way it makes sense from the point of view of the teacher and of particular students at specific moments. These analyses allow, subsequently, the researcher to explicitly discuss the various points of view adopted by students and by the teacher, relatively to the classical knowledge in Newton Mechanics, without having to judge wherever it is "true" or "false". Results show that some of the students' difficulties in learning physics are precisely related to misunderstandings occuring during history of science, that Newton encountered during his theorizing process.

Keywords

argumentation, clinical approach, communication, complexity, concept, intersubjectivity, learning, perspectives, preconception, reasoning, science education, semiotics, situation of misunderstanding.

Table des matières

1 Introduction **1**

1.1 Le défi intellectuel : mise en abîme . . . 5

1.2 Les origines de la recherche : mise en perspective . . . 7

1.2.1 Parcours intellectuel . . . 7

1.2.2 Parcours social . . . 8

1.3 Le plan du document : mise en forme . . . 15

I Problématique **19**

2 Le problème de l'apprentissage des sciences **23**

2.1 Des conceptions individuelles aux *situations de malentendu* . . . 27

2.1.1 Préambule . . . 27

2.1.2 Émergence d'une problématique . . . 28

2.1.3 Quelques repères dans la littérature sur les *conceptions* en science . . . 31

2.1.4 Exemples choisis de divergences théoriques . . . 32

2.1.5 Quelques remises en question des *conceptions* . . . 38

2.1.6 Synthèse : un problème de théorisation . . . 43

2.2 Intermède épistémologique . . . 45

2.2.1 Introduire une échelle en psychologie . . . 45

2.2.2 Une épistémologie perspectiviste . . . 57

2.3 Aborder l'apprentissage par les *situations de malentendu* . . . 63

2.3.1 Vers une résolution du débat sur les *conceptions* . . . 63

2.3.2 Une nouvelle perspective . . . 75

3 Coordination des approches choisies **93**

3.1 Approches du phénomène de malentendu . . . 99

3.1.1 Approches sociologiques . . . 99

3.1.2 Approches en psychologie et sciences de l'éducation . . . 100

3.1.3 Approches des sciences du langage . . . 104

3.2 Approches de l'apprentissage . . . 119

3.2.1 Ancrage en épistémologie génétique et en psychologie (micro)génétique . . . 120

3.2.2 Une approche clinique de l'activité située . . . 122

3.2.3 Une approche psychosociale de la construction des représentations . . . 123

3.2.4 Une approche cognitive des processus et des connaissances . . . 126

3.2.5 Une approche socio-génétique et socio-cognitive . . . 130

3.2.6 Une approche cybernétique et pragmatique de la communication . . . 133

3.2.7 Une approche interlocutoire de l'apprentissage . . . 135
3.2.8 Une approche socio-culturelle de l'apprentissage . . . 142
3.2.9 Une approche dialogique de la subjectivité . . . 144
3.2.10 Une approche historico-culturelle du langage et des instruments . . . 149
3.2.11 Des approches en didactiques des sciences . . . 152
3.2.12 Une approche centrée sur l'argumentation . . . 155
3.3 Une approche pour coordonner les autres . . . 159
3.3.1 Introduction à l'oeuvre de Grize . . . 159
3.3.2 Brève histoire de la logique naturelle . . . 166
3.3.3 Une théorie de la connaissance . . . 175
3.3.4 Une théorie de la communication . . . 182
3.3.5 Une sémiologie . . . 193
3.3.6 Synthèse et ajustement de la terminologie . . . 210
3.4 Question de recherche et opérationnalisation . . . 221
3.4.1 Vers une définition des *situations* . . . 222
3.4.2 Définition des *situations de malentendu* . . . 226

II Méthodologie 231

4 Constitution d'un corpus de traces 235
4.1 Démarche de recherche . . . 239
4.2 Marcottage à un projet de recherche international . . . 245
4.2.1 Ressources et contraintes issues du projet de recherche . . . 245
4.2.2 ESCALATE : objectifs, démarche et résultats . . . 247
4.3 Ingénierie didactique I : un dispositif d'enseignement mi-fini . . . 253
4.3.1 Analyse préalable des chercheurs . . . 254
4.3.2 Analyse *a priori* du dispositif d'enseignement mi-fini . . . 257
4.4 Ingénierie didactique II : la séquence d'enseignement planifiée . . . 289
4.4.1 Description du lieu de l'implémentation . . . 289
4.4.2 Analyse préalable des enseignants . . . 296
4.4.3 Analyse *a priori* de l'enseignant . . . 298
4.5 Ingénierie didactique III : la séquence d'enseignement effective . . . 303
4.5.1 Description de la séquence effective . . . 303
4.5.2 Analyses *a posteriori* . . . 314
4.6 Inventaires des traces à disposition . . . 337
4.6.1 Transition vers la seconde recherche . . . 337
4.6.2 Repérage en vue des prochaines analyses . . . 337

5 Identification et analyse des situations de malentendu **341**

5.1 Identification des situations de malentendu . . . 345

5.1.1 Opérationnalisation : la notion de *moment* . . . 345

5.1.2 Méthode d'analyse des incidents critiques . . . 348

5.2 Reconstruction du sens selon les points de vue des interlocuteurs . . . 355

5.2.1 Difficultés méthodologiques . . . 355

5.2.2 Une démarche abductive . . . 356

5.2.3 Une logique de l'action et des contenus . . . 356

5.2.4 Le rapport entre schématisation et pensée . . . 359

5.2.5 Reconstruire le point de vue institutionnel . . . 365

III Résultats **369**

6 Situations de malentendu dans des activités de didactique des sciences **373**

6.1 Introduction . . . 381

6.1.1 Démarche d'exposition des situations . . . 381

6.1.2 Références aux lois de la physique . . . 381

6.2 Situation #1 : *la Lune est en chute libre...* . . . 383

6.2.1 Résumé . . . 383

6.2.2 Présentation de l'incident critique . . . 384

6.2.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 391

6.2.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 396

6.2.5 Discussion . . . 401

6.3 Situation #2 : *g comme gravité.* . . . 405

6.3.1 Résumé . . . 405

6.3.2 Présentation des incidents critiques . . . 406

6.3.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 415

6.3.4 Enquête quant à une ou plusieurs situations de malentendu . . . 423

6.3.5 Évolution de la situation de malentendu portant sur la reprise indifférenciée par les élèves de deux classes-objets de l'enseignant . . . 433

6.3.6 Discussion . . . 441

6.4 Situation #3 : *"- fallait appuyer ?"* . . . 483

6.4.1 Résumé . . . 483

6.4.2 Présentation des incidents critiques . . . 484

6.4.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 497

6.4.4 Enquête quant à une situation de malentendu pour les trois cheminements . . . 507

6.4.5 Evolution de la situation de malentendu portant sur *diverses interactions entre la canne et le plafond* pour la posture (c) du personnage . . . 512

6.4.6 Discussion . . . 524

6.5 Situation #4 : *détente (du ressort)* . . . 535
6.5.1 Résumé . . . 535
6.5.2 Présentation des incidents critiques . . . 536
6.5.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 546
6.5.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 554
6.5.5 Discussion #1 : conception de la consigne et anticipation de la situation de malentendu 559
6.5.6 Discussion #2 : expliquer la difficulté des élèves par la situation de malentendu . . . 561
6.6 Situation #5 : *le poids des mots* . . . 563
6.6.1 Résumé . . . 563
6.6.2 Présentation de l'incident critique . . . 564
6.6.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 569
6.6.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 586
6.6.5 Évolution de la situation de malentendu *deux manières divergentes de "faire de la physique"* . . . 594
6.7 Situation #6 : *une parodie pour revanche* . . . 597
6.7.1 Résumé . . . 597
6.7.2 Présentation de l'incident critique . . . 598
6.7.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 608
6.7.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 620
6.7.5 Discussion . . . 625
6.8 Situation #7 : *attention, une flèche peut en cacher une autre...* . . . 631
6.8.1 Résumé . . . 631
6.8.2 Présentation de l'incident critique . . . 631
6.8.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 637
6.8.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 650
6.8.5 Discussion . . . 661

7 Discussion **671**
7.1 Le pari d'une perspective transdisciplinaire . . . 675
7.1.1 Expliquer le phénomène des *conceptions* par les situations de malentendu . . . 676
7.1.2 Identifier et décrire des divergences passées inaperçues aux interlocuteurs . . . 681
7.1.3 La question des conditions d'émergence des situations de malentendu . . . 683
7.2 Incidences sur la théorisation de l'apprentissage en milieu scolaire . . . 687
7.3 Incidences des choix épistémologiques : vers une psychologie des points de vue . . . 693
7.4 Les questions qui demeurent . . . 701
7.4.1 Argumentation et *inquiry learning* . . . 701
7.4.2 Les notions intermédiaires . . . 703
7.4.3 Vers une sémiologie du milieu scolaire . . . 704
7.4.4 Concernant le phénomène de malentendu... . . . 705

8 Épilogue **709**

8.1 Analyse historico-culturelle de la genèse des significations de mécanique classique 713

8.1.1 Les apports de Newton en mécanique : un changement d'approche 714

8.1.2 La méthode de Newton : entre malentendus et débats 718

8.2 Quelques réflexions sur le lien entre genèse des significations et enseignement 723

8.2.1 Des malentendus au temps de Newton à ceux d'aujourd'hui 723

8.2.2 Des malentendus de Newton à ceux des élèves 726

8.2.3 De la théorisation à l'apprentissage : cheminement à sens inverse 730

8.3 Physique et psychologie : que sont les savoirs de la physique newtonienne ? 733

8.3.1 Le sens classique et traditionnel d'*hypothèse* 733

8.3.2 De la physique newtonienne aux savoirs enseignés 736

8.3.3 De la mécanique classique à la mécanique quantique 741

IV Annexes **791**

A Glossaire **793**

B Documents scolaires **799**

B.1 Exercices pour le logiciel *Marbles Move* 803

B.1.1 Essais pilote en deux versions 803

B.1.2 Éléments du dispositif d'enseignement mi-fini (version A) 807

B.1.3 Éléments du dispositif d'enseignement mi-fini (version B) 812

B.2 Éléments de la séquence d'enseignement planifiée 817

B.2.1 Questionnaire pré-séquence élaboré par l'enseignant 817

B.2.2 Questionnaire post-séquence élaboré par l'enseignant 821

B.3 Objectifs et programme scolaire en physique 827

B.4 Polycopiés de cours utilisés par la classe étudiée 831

B.4.1 Cours intitulé "cinématique" 831

B.4.2 Cours intitulé "mouvement circulaire uniforme" 838

B.4.3 Cours intitulé "travail et énergie" 841

B.4.4 Cours intitulé "les lois de la dynamique" 854

C Reproduction des traces empiriques **867**

C.1 Chronologie de la séquence effective 871

C.2 Inventaire des traces enregistrées au fil de la séquence 873

C.3 Productions écrites des élèves 875

C.4 Graphes d'argumentation produits sur *Digalo* 905

C.4.1 Groupes de la demi-classe A 905

C.4.2 Groupes de la demi-classe A 908

C.5 Extraits du *mémoire professionnel* de l'enseignant 911
C.6 Transcriptions 915
C.6.1 Situation de malentendu #5 915
C.6.2 Situation de malentendu #6 916

D Compléments **927**
D.1 Rapport de recherche ESCALATE : extrait concernant *Marbles Move* 931
D.2 Description sommaire d'une leçon typique de Travaux Pratiques 949
D.3 Compléments aux analyses de traces 959
D.3.1 Compléments aux analyses *a posteriori* (ingénierie didactique) 959
D.3.2 Compléments aux analyses de logique naturelle 971

Liste des tableaux

3.1 Synthèse des conventions de notation des opérations logico-discursives utilisées dans cette recherche. . . . 213

4.1 Questionnaire soumis lors des essais pilote : taux de réussite aux trois questions et pourcentage d'élèves qui ont réussit la $3^{ème}$ question, selon les variables. . . . 278

4.2 Séquence effective des Travaux Pratiques et autres activités du 1^{er} semestre. . . . 306

4.3 Matériel à disposition des élèves pour leurs activités expérimentales. . . . 311

4.4 Plan de disposition des élèves et des enregistrements audio et vidéo. . . . 313

4.5 Liste des prénoms fictifs des élèves. . . . 314

4.6 Résultats de l'analyse des graphes d'argumentation pour les séquences A et B. . . . 320

4.7 Résultats du questionnaire différé (deux ans après la séquence). . . . 323

4.8 Synthèse des résultats de la deuxième partie du questionnaire différé. . . . 324

5.1 Nombre d'épisodes par type d'activité et par code. . . . 350

6.1 Résultat des opérations η et μ qualifiant les interactions entre le personnage, la canne et le plafond dans les réponses à l'item #2, posture (c). . . . 508

6.2 Répartition dans les groupes des points de vue divergents à l'item #2, posture (c). . . . 515

6.3 Analyse de la conversation entre Aurélie, Barbara et Sylvie sur l'item #4 à la phase 4 de la séquence. . . . 575

6.4 Schématisations du poids selon les interlocutrices. . . . 588

C.1 Présentation chronologique de la séquence effective. . . . 871

Liste des figures

1.1 Exemple d'item des questionnaires utilisés dans la recherche ACI. . . . 9

2.1 Métaphore graphique de deux perspectives, extrait de Kohler, 2018, p. 107. . . . 82

3.1 Métaphore graphique de la coordination des approches visitées dans cette recherche. . . . 94
3.2 Illustration de l'axiomatisation d'un corps de connaissances selon Grize (1982, p. 39). . . . 179
3.3 Schéma du modèle de la communication (extrait de Grize, 1996, p. 68). . . . 185
3.4 Schéma de la progression en spirale (ou plus précisément en *hélice conique*). . . . 188
3.5 Schéma du modèle du signe de Grize (1996, p. 42). . . . 194
3.6 Schéma augmenté du modèle du signe (adapté de Grize, 1996). . . . 199
3.7 Schéma présentant l'ensemble des objets et opérations de la logique naturelle (Grize, 1996, p. 104). . . . 201
3.8 Schéma approximatif de la coordination des approches dans la perspective adoptée pour cette recherche, sur les quatre échelons choisis. . . . 220

4.1 Schéma de la démarche empirique. . . . 239
4.2 Schéma de marcottage en botanique. . . . 245
4.3 Schéma du dispositif expérimental (Piaget, 1972a, p. 21). . . . 262
4.4 Pendule de Newton. . . . 264
4.5 Capture d'écran commentée du logiciel *Marbles Move*. . . . 268
4.6 Photos du dispositif concret fourni aux élèves lors de essais pilotes du logiciel *Marbles Move*. 271
4.7 Photo du dispositif concret et du logiciel *Marbles Move*, phase 2 de la séquence. . . . 309
4.8 Captures d'écran d'une couche pleine et d'une couche vide dans la même session du logiciel *Digalo*, avec commentaire en rouge. . . . 310
4.9 Proportion des diverses activités des groupes pour l'ensemble des leçons des séquences A et B. 318
4.10 Nombre d'élèves ayant émis un jugement adéquat en fonction des modalités des affirmations. 325
4.11 Comparaison des proportions par type d'activité des groupes d'élèves entre les leçons avec *Marbles Move* et celles avec *Digalo*. . . . 328
4.12 Comparaison des performances des élèves aux pré-questionnaire et post-questionnaire entre deux classes du même établissement scolaire. . . . 331
4.13 Inventaire des traces enregistrées. . . . 338

6.1 Feuille d'exercices sur la force de gravitation. . . . 384
6.2 Commentaires de la feuille d'exercices sur la force de gravitation. . . . 386
6.3 Feuille d'exercices sur la force de gravitation complétée par le chercheur. . . . 387
6.4 Feuille d'exercices sur la force de gravitation complétée par Pauline. . . . 388
6.5 Commentaires de la feuille d'exercices sur la force de gravitation complétée par Pauline. . . . 389
6.6 Commentaires de la réponse de Pauline à l'exercice 2. . . . 394

6.7 Découpage de la feuille d'exercices selon le sens de la lecture. . . . 398
6.8 Item #1 du questionnaire. . . . 406
6.9 Les traces inscrites au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de l'item #1 à la phase 5 de la séquence. . . . 416
6.10 Représentation schématique et partielle du cheminement #1, situation de malentendu #2. . . . 419
6.11 Représentation schématique et partielle du cheminement #2, situation de malentendu #2. . . . 421
6.12 Représentation schématique et partielle du cheminement #2, situation de malentendu #2. . . . 422
6.13 Représentation schématique complétée du cheminement #1, situation de malentendu #2. . . . 426
6.14 Item 7 du questionnaire. . . . 432
6.15 Conversation *Digalo* de la demi-classe 02 sur l'item 1 du questionnaire. . . . 435
6.16 Illustration présentant la préconception, (Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 215). . . . 453
6.17 Illustration présentant le modèle épistémologique des auteurs, (Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 233). . . . 454
6.18 Item 2 du questionnaire. . . . 484
6.19 Les traces inscrites au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de la posture (a) de l'item #2 à la phase 5 de la séquence. . . . 498
6.20 Conversation Digalo de la demi-classe A sur l'item 2 du questionnaire. . . . 517
6.21 Conversation Digalo de la demi-classe B sur l'item 2 du questionnaire. . . . 519
6.22 Solution proposée par Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p. 113. . . . 525
6.23 Item #4 du questionnaire. . . . 536
6.24 Inscription au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de l'item #4 à la phase 5 de la séquence. . . . 548
6.25 Conversation Digalo de la demi-classe A sur l'item 4 du questionnaire. . . . 551
6.26 Conversation Digalo de la demi-classe B sur l'item 4 du questionnaire. . . . 553
6.27 Transcription d'un échange sur le graphe Digalo (demi-classe B - item 4) avec mention de la hiérarchisation de l'enchaînement conversationnel. . . . 553
6.28 Item #4 du pré-questionnaire : version initiale (à gauche) et finale (à droite). . . . 559
6.29 Extrait de l'enregistrement vidéographique du dispositif expérimental. . . . 565
6.30 Exemple de rapport expérimental justifié et conforme sur l'item #4, rapport de Ernest, Ferdinand et Xavier. . . . 566
6.31 Exemple de rapport expérimental justifié et conforme sur l'item #4, rapport de Cassandra, Julianne et Laurie. . . . 566
6.32 Consigne de l'exercice 5D. . . . 599
6.33 Schéma pour la résolution de l'exercice 5D, du point de vue du concepteur. . . . 599
6.34 Formulaires et Tables, Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985, p. 159. . . . 600
6.35 Formulaires et Tables, Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985, p. 165. . . . 601
6.36 Synopsis des interlocutions du groupe d'Aurélie, Barbara et Sylvie au cours des deux leçons. 606
6.37 Graphe de la structure conversationnelle du premier épisode. . . . 613
6.38 Graphe de la structure conversationnelle des trois épisodes. . . . 618

6.39 Formulaires et tables, extrait de la page 159 annotée. . . . 622
6.40 Illustration des forces de frottement (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985, p. 163). . . . 632
6.41 Consigne et dessin des forces effectué par une élève sur son polycopié de cours, "Travail et énergie" (voir p. 841). . . . 634
6.42 Découpage en trois étapes par modification de l'esquisse de l'élève présentée à la figure 6.41. 634
6.43 Triangle imaginé sur l'esquisse de l'élève présentée à la figure 6.41. . . . 635
6.44 Dessin des forces de Pauline rencontré lors de l'analyse de la situation de malentendu #1. . 635
6.45 Divers dessins des forces dans les polycopiés de cours distribués aux élèves par l'enseignant. . 636
6.46 Divers dessins des forces dans les productions des élèves à l'item #3 du pré-questionnaire. . 636
6.47 Illustration de la loi de l'inertie, ou *principe d'inertie*. . . . 638
6.48 Un dessin des forces présenté dans le polycopié de cours. . . . 639
6.49 Le dessin des forces présenté au tableau noir pour la correction de la situation-problème #1. 640
6.50 Inscription au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de la posture a) de l'item #2 à la phase 5 de la séquence. . . . 641
6.51 Agrandissement du dessin des forces de Sylvie, voir figure 6.52, p. 645. . . . 644
6.52 Le dessin des forces mettant en oeuvre le calcul trigonométrique dans un exercice écrit d'élève. 645
6.53 Le dessin des forces de Annette, item #3 du pré-questionnaire. . . . 646
6.54 Le dessin des forces du groupe Germaine, Ilona et Urs dans le rapport expérimental de la situation-problème #5. . . . 647
6.55 Le dessin des forces de Alain, à l'item #3 au pré-questionnaire (encadré de gauche) et à l'item #9 au post-questionnaire (encadré de droite). . . . 648
6.56 Le dessin des forces de Cassandra, situation-problème #3 du pré-questionnaire. . . . 649
6.57 Extrait de la feuille d'exercice de Daniel *avant* la réponse à l'exercice 4A, activité 4 Marble Moves. . . . 655
6.58 Esquisse de l'enseignant en marge de la feuille d'exercice de Daniel, activité 4 Marble Moves. 656
6.59 Extrait des réponses de Daniel à l'exercice 4A, activité 4 Marble Moves. . . . 658
6.60 Dessins des forces des élèves à l'exercice 4A avec une flèche effacée dans le sens du mouvement. 658

7.1 Schéma augmenté du modèle de la communication (extrait de Grize, 1996, p. 68). . . . 688

B.1 Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 1), situations et explications - page 1. 803
B.2 Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 1), situations et explications - page 2. 804
B.3 Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 2), situations. . . . 805
B.4 Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 2), explications. . . . 806
B.5 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 1. . . . 807
B.6 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 2. . . . 808
B.7 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 3. . . . 809
B.8 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 4. . . . 810
B.9 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 5. . . . 811
B.10 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 1. . . . 812

B.11 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 2. . . . 813
B.12 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 3. . . . 814
B.13 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 4. . . . 815
B.14 Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 5. . . . 816
B.15 Questionnaire pré-séquence : item 1. . . . 817
B.16 Questionnaire pré-séquence : item 2. . . . 818
B.17 Questionnaire pré-séquence : item 3. . . . 818
B.18 Questionnaire pré-séquence : item 4. . . . 819
B.19 Questionnaire pré-séquence : item 5. . . . 819
B.20 Questionnaire pré-séquence : item 6. . . . 820
B.21 Questionnaire post-séquence : item 7. . . . 821
B.22 Questionnaire post-séquence : item 8. . . . 822
B.23 Questionnaire post-séquence : item 9. . . . 823
B.24 Questionnaire post-séquence : item 10. . . . 823
B.25 Questionnaire post-séquence : item 11. . . . 824
B.26 Questionnaire post-séquence : item 12. . . . 825
B.27 Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 1. 827
B.28 Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 2. 828
B.29 Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 3. 829
B.30 Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 4. 830
B.31 Extrait du cours "cinématique" : la chute libre d'un corps dans le vide. . . . 831
B.32 Cours sur le mouvement circulaire uniforme - La force de gravitation. . . . 838
B.33 Cours théorique - première loi de Newton. . . . 854
B.34 Cours théorique - deuxième et troisième lois de Newton. . . . 864
B.35 Cours théorique - situations et problèmes. . . . 865

C.1 Légende de l'inventaire des traces (figure C.2). . . . 873
C.2 Inventaire des traces disponibles par type et par élève. . . . 874
C.3 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #1. . . . 905
C.4 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #2. . . . 906
C.5 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #3. . . . 906
C.6 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #4. . . . 906
C.7 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #5. . . . 907
C.8 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #6. . . . 907
C.9 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #1. . . . 908
C.10 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #2. . . . 908
C.11 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #3. . . . 909
C.12 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #4. . . . 909
C.13 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #5. . . . 909

C.14 Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #6. 910

D.1 Durées des diverses activités des groupes d'élèves au fil des leçons de la séquence A, par fichier audio ou vidéo. 959

D.2 Durées des diverses activités des groupes d'élèves au fil des leçons de la séquence B, par fichier audio ou vidéo. 960

D.3 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Aurélie & Sylvie. 961

D.4 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Aurélie & Sylvie. 961

D.5 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie. 961

D.6 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie. 961

D.7 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Ernest & Ferdinand. 962

D.8 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Ernest & Ferdinand. 962

D.9 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Ophélie & Victor. 962

D.10 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Aurélie, Barbara & Sylvie. 962

D.11 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Ferdinand, Julianne & Laurie. 962

D.12 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Ferdinand, Julianne & Laurie. 963

D.13 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ophélie, Victor & Xavier. 963

D.14 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette. 963

D.15 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette. 963

D.16 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves. 963

D.17 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves. 964

D.18 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Germaine, Ilona & Urs. 964

D.19 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault. . . . 964

D.20 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault. . . . 964

D.21 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Aurélie, Barbara & Sylvie. 964

D.22 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Aurélie, Barbara & Sylvie. 965
D.23 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Annette, Ophélie & Victor. 965
D.24 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier. 965
D.25 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier. 965
D.26 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier. 966
D.27 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie. 966
D.28 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie. 966
D.29 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette. 966
D.30 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette. 966
D.31 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves. 967
D.32 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves. 967
D.33 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves. 967
D.34 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Germaine, Ilona & Urs. 967
D.35 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault. . . . 967
D.36 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault. . . . 968
D.37 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Annette & Ophélie. 968
D.38 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Annette & Ophélie. 968
D.39 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Annette & Ophélie. 968
D.40 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Barbara & Sylvie. 968
D.41 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie. 969
D.42 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie. 969
D.43 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier. 969

D.44 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier. 969
D.45 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette. 970
D.46 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette. 970
D.47 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette. 970
D.48 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves. 970
D.49 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves. 970
D.50 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Germaine, Ilona & Urs. 971
D.51 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault. 971
D.52 Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault. 971
D.53 Graphe du cheminement #1, situation de malentendu #2. 974
D.54 Représentation schématique complète du cheminement #1, situation de malentendu #2. . . 976
D.55 Graphe de la structure conversationnelle des trois épisodes, avec les opérations d'organisation raisonnée (τ) du groupe. 978

Liste des transcriptions

6.1 Phase 5 - Correction de l'item #1 - Demi-classe B - 27 février - 00' à 04' 415
6.2 Phase 5 - Correction de l'item #2 - Demi-classe B - 27 février - 04' à 10' 497
6.3 Phase 3 - Discussion sur l'item #2 - Groupe de Barbara et Sylvie - 16 janvier - 51' à 52' . . 520
6.4 Phase 3 - Discussion sur l'item #2 - Groupe de Barbara et Sylvie - 16 janvier - 55' à 56' . . 521
6.5 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 60' à 63' 603
6.6 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 32' 609
6.7 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 37' à 38' 611
6.8 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 38' à 39' 612
6.9 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 39' 613
6.10 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 42' 614
6.11 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 44' 614
6.12 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 56' 615
6.13 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 56'-57' 616
6.14 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 58' 616
6.15 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 39' à 41' 618
6.16 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 30' 627
6.17 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 31' à 32' 628
C.18 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 29' à 39' 918
C.19 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 39' à 41' 921
C.20 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 56' à 60' 923
C.21 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 60' à 62' 924
C.22 Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 62' à 63' 926

Chapitre 1

Introduction

– J'ai compris. Je voulais juste les mots pour le dire, que tu puisses comprendre que j'ai compris et me dire que tu as compris que j'ai compris, et que je comprenne que tu m'aies compris et que t'aies compris que je t'aie compris...

Sommaire

1.1 Le défi intellectuel : mise en abîme 5
1.2 Les origines de la recherche : mise en perspective 7
1.2.1 Parcours intellectuel 7
1.2.2 Parcours social 8
1.3 Le plan du document : mise en forme 15

1.1 Le défi intellectuel : mise en abîme

Dans *La redécouverte de l'esprit* Searle (1995) a pour objectifs de réintroduire la *conscience* dans l'étude de l'esprit, de critiquer les traditions dominantes matérialistes [4] et dualistes pour "en venir à bout" (*idem,* p. 13), d'enfoncer "le dernier clou dans le cercueil de la théorie qui fait de l'esprit un programme d'ordinateur, et de justifier "l'espoir d'une redécouverte de l'esprit". En psychologie, Bruner (1991a) argumente dans le même sens et contribue à fonder la psychologie culturelle, à défaut de révolutionner la psychologie cognitive. Plus tard, Jalley (2006) fournit une critique de la psychologie contemporaine qui montre combien les œuvres francophones de deux grandes figures, Henri Wallon et Jean Piaget, ont été mal comprises par assimilation à un réductionnisme matérialiste et dualiste. Malgré ces excellents ouvrages et bien d'autres tentatives similaires, la psychologie et les sciences cognitives en général sont toujours dominées par ces traditions, plus d'un quart de siècle après la parution de *La redécouverte de l'esprit*.

Plutôt qu'un travail critique, dont il existe déjà de nombreux et excellents exemples, cette recherche s'attelle à investiguer - et éventuellement montrer - le "social de l'esprit" à travers une étude empirique de son fonctionnement en situation, en prenant soin de paramétrer la recherche de manière à ne pas occulter, justement, cette dimension. Dans ce but, il paraît d'emblée indispensable d'adopter une approche de la complexité (au sens de Morin, 1982/1990) [5], puisque le réductionnisme matérialiste et le dualisme sont bien plus souvent les effets d'une confortable simplification de l'objet d'étude par les chercheurs que les résultats d'une prise de position épistémologique dûment réfléchie et argumentée. Je chercherai donc par prudence à ne pas réduire la complexité du phénomène étudié *avant* de mener l'enquête empirique, mais seulement *après* et strictement dans la mesure où les résultats le permettent.

Le domaine par excellence de l'étude du fonctionnement de l'esprit est probablement l'apprentissage : les sciences cognitives sont toujours concernées par des activités d'apprentissage, et la vaste majorité des recherches exigent de participants d'apprendre quelque chose, dans une multitude de tâches conçues spécialement pour étudier leur performance ou leurs procédures. J'ai opté pour une observation en milieu naturel, car les tests de laboratoire comprennent le risque d'exclure justement les dimensions sociales, culturelles et historiques du fonctionnement de l'esprit dans un milieu humain naturel.

4. Searle (1995) désigne ici le réductionnisme matérialiste, comme en atteste le passage suivant : "La conscience comme l'intentionnalité sont des processus biologiques causés par des processus neuronaux **de niveau inférieur** se déroulant dans le cerveau, et ni l'une ni l'autre n'est réductible à quoi que ce soit d'autre." (p. 14), la mise en évidence est ajoutée par mes soins pour signaler l'importance de la question des "niveaux", sur laquelle je reviendrai au chapitre suivant.

5. Morin 1982/1990, pp. 128-129, définit ainsi une approche ed la complexité : "Comme vous le voyez, le but de ma recherche de méthode n'est pas de trouver un principe unitaire de toutes connaissances, ce serait une nouvelle réduction, la réduction à un principe maître, abstrait, qui effacerait toute la diversité du réel, ignorerait les béances, incertitudes et apories que provoque le développement des connaissance (lequel comble des béances, mais en rouvre d'autres, résout des énigmes, mais révèle des mystères). C'est la communication sur la base d'une pensée complexe. A la différence d'un Descartes qui partait d'un principe simple de vérité, c'est-à-dire identifiait la vérité aux idées claires et distinctes, et par là pouvait proposer un discours de la méthode de quelques pages, je fais un très long discours à la recherche d'une méthode, qui ne se révèle par aucune évidence première, et doit s'élaborer dans l'effort et le risque. La mission de cette méthode n'est pas de donner les formules programmatiques d'une "saine" pensée. Elle est d'inviter à penser soi-même dans la complexité. Ce n'est pas de se donner la recette qui enfermerait le réel dans une boîte, c'est de nous fortifier dans la lutte contre la maladie de l'intellect - l'idéalisme - , qui croit que le réel peut se laisser enfermer dans l'idée et qui finit par considérer la carte de l'I.G.N. comme étant le territoire, et contre la maladie dégénérative de la rationalité, qui est la rationalisation, laquelle croit que le réel peut s'épuiser dans un système cohérent d'idées.".

J'ai ainsi choisi de m'intéresser à des situations d'apprentissage en milieu scolaire, et de l'apprentissage d'une discipline parmi celles qui se partagent la réputation d'être difficiles : la physique newtonienne. Le choix de la physique permet également de confronter ma recherche - centrée sur les processus d'apprentissage - à des savoirs de référence parmi ceux qui jouissent d'un statut de scientificité indubitable, puisqu'ils se trouvent souvent être à l'origine même des représentations de *la science* que défendent les tenants du positivisme, du réductionnisme matérialiste et du dualisme. Les processus observés concerneront ainsi l'acquisition de savoirs dont le statut de "savoirs scientifiques" ne peut être (facilement) remis en doute. En effet, la mécanique newtonienne est prototypique de la pensée scientifique du fait qu'il devrait justement y avoir univocité quant aux savoirs enseignés, alors que ce n'est souvent pas le cas pour d'autres savoirs enseignés.

En outre, la littérature internationale dédiée aux recherches sur l'apprentissage des sciences naturelles m'offrait une opportunité particulière de confronter les traditions dominantes réductionnistes et dualistes à une démarche alternative au moment de commencer cette thèse : le débat sur les "conceptions" des élèves, présentées comme des obstacles à l'instruction scolaire, m'a permis de proposer une alternative à la théorisation, plus ou moins explicite, de processus d'apprentissage strictement individuels et cognitifs, faisant fi du social, de la communication et des autres dimensions de l'activité humaine.

À partir de là, il me restait une question cruciale pour terminer la conception de ma recherche : à quoi faut-il s'intéresser pour pouvoir éventuellement observer la part sociale constitutive de la pensée des élèves apprenant la physique newtonienne ? Si les positions matérialistes et dualistes sont si répandues et résistent tant à la critique, malgré la pertinence des arguments, c'est aussi parce que la mise en évidence des phénomènes de conscience, d'intentionnalité, et la constitution sociale, culturelle et historique de notre esprit se révèle particulièrement difficile empiriquement. J'ai ainsi choisi pour phénomène à étudier le malentendu [6] espèce d'accident anecdotique de la communication, qui a néanmoins le potentiel de fournir le révélateur - au sens de la chimie - des processus sociaux à la rencontre des intentionnalités et des consciences, voire des processus constitutifs de la pensée des élèves, processus que le fonctionnement ordinaire et réussi des échanges rend invisible et opaque au chercheur - les fameuses "boîtes noires" de la psychologie.

C'est ainsi que j'ai le plaisir de vous présenter cette recherche conjuguant des approches psychologiques (et autres) pour aborder des situations de malentendu entre élèves et enseignant, à l'occasion d'activités de didactique des sciences en milieu scolaire conçues pour faire émerger les soi-disant "conceptions" des élèves dans le domaine de la mécanique.

Bonne lecture !

6. Je profite de cette opportunité pour remercier Anne-Nelly, qui m'a suggéré cette idée : c'est un de ces moments qui reste gravé dans la mémoire avec les moindres détails, jusqu'au fait que nous étions en train de commander des cafés au comptoir de la cafétéria de la Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Neuchâtel un jour ensoleillé.

1.2 Les origines de la recherche : mise en perspective

1.2.1 Parcours intellectuel

Cette recherche n'aurait jamais eu lieu si ce n'est pour l'histoire dans laquelle elle s'inscrit : à travers mes études, mes lectures et ma participation à des projets de recherche menés à l'Institut de psychologie de Neuchâtel, dans une communauté vivante et stimulante de chercheurs plus passionnants les uns que les autres, le projet de cette thèse a pris forme jusqu'à suivre son propre chemin au fil des années. Avant de suivre le fil de ce parcours dans les prochains chapitres, cette section présente quelques éléments d'ancrage pour en schématiser le point d'origine.

Cette section a aussi pour but de permettre au lecteur de comprendre mon implication dans ma recherche, mon point de vue de chercheur, précisions que je lui dois si je souhaite demeurer cohérent avec mes propres références théoriques :

> *"Ainsi, nous voyons que le progrès même de la connaissance scientifique nécessite que l'observateur s'inclue dans son observation, que le concepteur s'inclue dans sa conception, en somme que le sujet se réintroduise de façon autocritique et autoréflexive dans sa connaissance des objets."*
>
> *(Morin, 1982/1990, p. 29)*

Je serai attentif tout au long de cette recherche à préciser mon point de vue de chercheur et à expliciter mes choix, et les raisonnements qui les sous-tendent, non seulement par souci de transparence, mais aussi pour favoriser les débats avec mes lecteurs.

L'origine de mon questionnement, lors de mes études à l'Université de Neuchâtel, est ancrée dans la psychologie inhélderienne reprise par Perret-Clermont (1979/2000) pour montrer l'importance du social dans le développement cognitif, dans un premier temps à l'aide de la mise en évidence expérimentale du rôle du conflit socio-cognitif dans le développement des enfants (Perret-Clermont, 1979 ; Perret-Clermont, Brun, Saada, & Schubauer-Leoni, 1984 ; Schubauer-Leoni & Perret-Clermont, 1980), puis en s'orientant de plus en plus vers l'activité cognitive en milieu naturel, questionnant notamment les pratiques scolaires Perret-Clermont (1976) ; Perret-Clermont, Brun, Conne, et Schubauer-Leoni (1982) ; Perret-Clermont et Nicolet (1988) ; Perret-Clermont et Schubauer-Leoni (1989), les effets du contexte social sur l'apprentissage (Perret-Clermont, Schubauer-Leoni, & Grossen, 1990), et allant jusqu'à investiguer les conditions nécessaires à l'aménagement d'un *espace thérapeutique* (Grossen & Perret-Clermont, 1992), puis d'un *espace de pensée* Perret-Clermont (1991, 2011), avant de s'orienter vers l'étude des implicites en situation scolaire (Perret-Clermont, 1992) et de l'argumentation des enfants à l'école et dans divers contextes (Greco Morasso, Mehmeti, & Perret-Clermont, 2016 ; Greco Morasso, Miserez-Caperos, & Perret-Clermont, 2015 ; Mehmeti & Perret-Clermont, 2016 ; Perret-Clermont, Arcidiacono, Breux, Greco, & Miserez-Caperos, 2015 ; Perret-Clermont & Muller Mirza, 2009 ; Perret-Clermont et al., 2019 ; Sinclaire-Harding, Miserez, Arcidiacono, & Perret-Clermont, 2013).

L'approche socio-cognitive évoquée ci-dessus, m'a invité à explorer les multiples domaines de recherche qui constituent ses fondements historiques : l'*épistémologie génétique* de Piaget, la psychologie sociale, et de nombreuses approches dont je donnerai un bref aperçu au chapitre 3 : la psychologie historico-culturelle de Vygotski et la théorie de l'activité d'origine russe, la psychologie culturelle de Bruner, celle de Valsiner, et les diverses approches socio-culturelles et dialogiques émanant de ces influences. J'ai cherché dans cette recherche à intégrer les multiples regards de ces approches sur un phénomène problématique pour les chercheurs - l'apprentissage des sciences naturelles - de manière à tenter d'enrichir le regard dans une perspective intégrative de plusieurs approches.

En parallèle, je découvrais par mes études dans d'autres universités romandes les courants de recherche des sciences cognitives, façonnés par l'approche computationnelle et la théorie du traitement de l'information, qui servent de cadre théorique de référence à la majorité des publications internationales en psychologie cognitive. La confrontation à cette littérature, qui ne laisse pratiquement aucune place au débat avec des courants plus minoritaires, a suscité mon intérêt pour une confrontation intellectuelle entre ces approches. Découvrant les critiques de Bruner, puis de Piaget, je suis remonté aux sources historiques de ce qui m'est alors apparu plutôt comme un problème théorique - voire philosophique - qu'une question de psychologie empirique. Je me suis alors pris au jeu de la théorisation, reprenant le projet de Piaget d'une *épistémologie empirique*, et procédant à une critique des approches étudiées dans le but de dépasser le fractionnement de la psychologie en de multiples approches s'ignorant les unes les autres, et dans le but de coordonner ces approches entre elles, au moins le temps d'une recherche singulière [7].

Il me fallait néanmoins encore trouver les outils d'une telle coordination, le ciment de ce nouvel ensemble. Si l'œuvre de Grize prend une place prépondérante dans ma thèse, c'est justement parce qu'elle joue ce rôle : j'ai cependant probablement donner faussement l'impression, ce faisant, que les autres approches étaient moins importantes. Rien n'est plus faux, car si mon attention a naturellement été particulièrement accaparée par ce qui m'a permis de coordonner des approches multiples sur le même phénomène, la "dernière pièce" de mon puzzle, chaque pièce de l'édifice y est néanmoins indispensable. J'espère que le lecteur saura me pardonner cet excès d'enthousiasme pour l'œuvre de Grize, sans laquelle je ne serais pas parvenu à coordonner les approches mobilisées pour ce travail en une seule perspective.

1.2.2 Parcours social

À ce récit de mon parcours intellectuel, s'ajoute celui, plus prosaïque, des opportunités concrètes et des heureuses rencontres qui m'ont lancé dans l'action. Dans une recherche antérieure, la recherche ACI [8],

7. Rêvant d'une *psychologie intégrative* avec de nouveaux interlocuteurs occupés à décrire *la crise en psychologie* (voir p.ex. : Cole & Valsiner, 2005), j'ai néanmoins fini par me rendre compte de l'ampleur titanesque de la tâche philosophique d'une telle intégration. Sur l'excellent conseil de Gérard Vergnaud, dont la théorie du champ conceptuel me donnait le plus grand espoir pour une telle intégration, je me suis résolu à utiliser pour une recherche singulière la démarche intellectuelle dont je rêvais d'écrire une théorie générale. C'est ainsi que cette recherche a pris la forme d'une étude transdisciplinaire, intégrant une sélection d'approches - triées sur le volet - pour traiter du phénomène choisi tout en les coordonnant les unes aux autres, mais sans viser pour autant une coordination *en général* de ces approches.

8. Il s'agit de la recherche *La dynamique des apprentissages : des fonctions cognitives à l'élaboration des connaissances - relations entre apprentissages et modes d'action pédagogiques*, coordonnée par Christine Sorsana, et financée par l'action *Ecole et Sciences Cognitives* du Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies de France. Cette recherche a réuni

j'ai fait des observations qui m'ont conduit à orienter cette recherche sur les *situations de malentendu*. La recherche ACI visait une description des interactions sociales entre enfants engagés dans des tâches de résolution de problèmes et de conception d'objets à l'école obligatoire en France. Cette description, établie à l'aide de la Logique Interlocutoire (Kostulski & Trognon, 1997 ; Trognon & Batt, 2003 ; Trognon, Batt, Schwarz, Perret-Clermont, & Marro, 2003), avait pour but de tracer les progrès cognitifs des enfants, de manière à aboutir à une proposition théorique sous forme de modèle formel des processus cognitifs des enfants apprenant dans et par l'interaction (pour en savoir plus sur les objectifs de cette recherche quant au développement de la *Logique Interlocutoire*, voir : Trognon, Batt, Rebuschi, & Sorsana, 2010 ; Trognon et al., 2003).

Sur le plan didactique, la recherche ACI visait à contribuer à une meilleur compréhension des obstacles épistémiques et techniques pour les élèves impliqués dans des activités de résolution de problèmes et de fabrication d'objets en classe de science de la nature, et à mettre en évidence la dimension pragmatique des échanges en classe afin d'en faire un outil de la formation des enseignants. Or, au sein de l'équipe de recherche, nous avons observé des situations où il apparaissait que ce que le chercheur considère comme pertinent dans une situation problème est loin d'être perçu comme tel par les élèves. Cette observation inattendue m'a rendu attentif au fait que les élèves se concentrent parfois sur un élément de détail, qui paraît de peu d'importance du point de vue des chercheurs, ce qui les conduit à passer à côté des raisonnements attendus et orientés par les savoirs à enseigner.

Voici un exemple issu de cette recherche. Dans la recherche ACI, l'item de questionnaire reproduit sur la figure 1.1 (voir ci-dessous) a pour objectif d'évaluer les connaissances des élèves quant à la proportionnalité, sur le problème de la balance (pour une explication des enjeux cognitifs de la tâche voir : Inhelder & Piaget, 1955, chapitre XI).

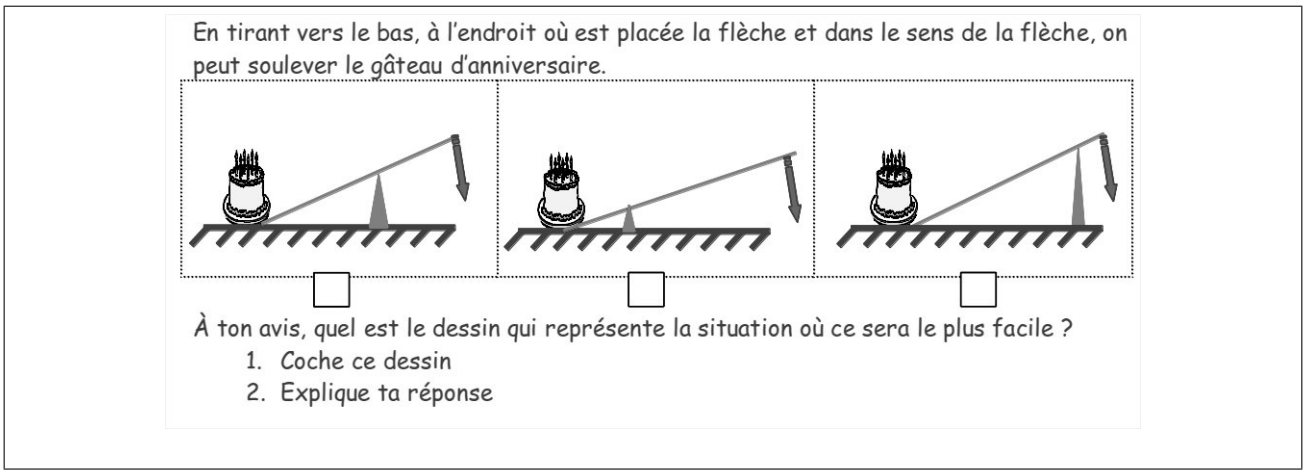


FIGURE 1.1 – Exemple d'item des questionnaires utilisés dans la recherche ACI.

trois laboratoires : le Laboratoire de Psychologie Clinique et Cognitive des Universités de Nancy 2 et Metz Paul Verlaine, l'Institut de Psychologie de l'Université de Neuchâtel (Suisse) et l'IUFM de Aix et Marseille associé au Centre de Recherche en Psychologie de la Connaissance, du Langage et de l'Émotion de l'Université de Provence.

Chercheurs et enseignants s'attendent à ce que l'orientation de l'attention de l'élève se concentre sur le positionnement du pivot triangulaire sous la planche, parce qu'il s'agit de la seule variable pertinente pour déterminer la force d'appui nécessaire à soulever le gâteau qui change d'une illustration à l'autre.

Certains élèves, cependant, se sont concentrés sur un détail infime de la représentation visuelle pour fournir une réponse : la planche n'est pas placée de manière identique sous le gâteau. Alors que la réponse attendue consiste à cocher l'illustration centrale, la planche y est comme enfoncée dans le sol, ce qui a disqualifié cette option pour quelques élèves qui choisissent l'option tout à gauche, la seule où la planche est positionnée correctement par rapport au gâteau. Comme les élèves devaient fournir une justification à leur réponse, celles-ci nous ont permis de prendre conscience de cette orientation inattendue de l'attention sur un détail des illustrations. Voici trois réponses d'élèves (sur 17) qui vont dans ce sens :

Extrait de réponses d'élèves à l'item de la figure 1.1 p. 9

```
- si on le place vers la 2 le gâteau glisse, si on le met au bout le gâteau
    tombera
- si on prend le gâteau d'anniversaire au milieu ou aux côtés ça tombe
- quand on va tirer vers le bas, le gâteau ne va pas tomber
```

Dans ces réponses inattendues, la préoccupation des élèves n'est pas la distance entre le pivot triangulaire et le gâteau, qui détermine le "bras de levier", mais de ne pas faire tomber le gâteau. Cette anecdote m'a mis sur la piste du problème de l'interprétation de la tâche par l'élève, qui échappe en partie aux anticipations des chercheurs (et des enseignants), et ne permet pas toujours de catégoriser les réponses selon ce qui a été imaginé lors de la conception de la recherche. Que faire dans de telles circonstances ? Faut-il considérer ces réponses *erronées* ? Le raisonnement de ces élèves n'est-il pas *correct*, en tant que tel, même s'il ne répond pas aux intentions des chercheurs ?

Les réponses des élèves citées ci-dessus montrent que leur point de vue peut être cohérent et fondé - ils justifient leurs réponses en utilisant les illustrations fournies et en y prêtant attention - sans qu'ils ne répondent pour autant de la manière escomptée. Pour l'enseignant ou le chercheur ayant conçu le problème, une seule variable est considérée pertinente pour répondre à la question : la position du pivot sous le levier. Si l'on utilise un tel problème pour évaluer l'élève, c'est effectivement dans l'idée de voir si l'élève sait identifier cette variable conformément aux savoirs enseignés. À partir de là, toute réponse divergente peut être évaluée comme *erronée*. Les missions institutionnelles de l'école et les objectifs d'enseignement permettent éventuellement de défendre cette position pour un enseignant ; mais pour le chercheur c'est un problème, car cette manière de procéder ne lui permet pas de rendre compte de la manière de penser de l'élève, alors que c'est justement l'objectif d'une recherche portant sur l'apprentissage.

Plus précisément, se contenter de juger les réponses divergentes de ces élèves *erronées* sans se préoccuper du raisonnement des élèves et de sa cohérence *de leur point de vue* passe à côté de deux éléments importants :

1. Une telle démarche fait comme si le seul élément pertinent est celui que les chercheurs définissent eux-mêmes comme tel, procédant à une sélection drastique et arbitraire dans l'observation, qui laisse dans l'ombre le fait que, du point de vue des élèves, tout le reste de la situation peut aussi être investi de sens, comme la relation entre le gâteau et la planche dans l'exemple ci-dessus.

2. Une telle démarche ne prend pas en considération que l'élève n'est pas seulement en situation de montrer ses connaissances - qui est la finalité de la recherche *du point de vue des chercheurs* - mais qu'il est aussi en situation de deviner les attentes et intentions, c'est-à-dire à interpréter les dimensions sociales et communicatives (voir les travaux socio-cognitifs cités ci-dessus). Autrement dit, du point de vue de l'élève, la même consigne est utile *à la fois* pour faire monstration de ses connaissances, et pour deviner de quoi il s'agit, c'est-à-dire pour induire le sujet de la conversation, les normes sociales et ce qu'il est socialement désirable de dire en réponse à cette question, comme le fait de se concentrer sur la distance entre le gâteau et le pivot dans l'exemple ci-dessus. Un élève préoccupé par le fait de manger ce gâteau d'anniversaire, après l'avoir soulevé, échoue plutôt dans son processus d'inférence sur le sens *social* de la question que quant à ses connaissances de physique.

À partir de cette observation et des réflexions énoncées ci-dessus, il paraît intéressant de faire l'hypothèse que surviennent des situations de malentendu dans les activités scolaires*quand bien même enseignants et élèves cherchent à les éviter*. L'enseignant tente d'éviter ces situations de malentendu parce qu'ils ne permettent pas vraiment d'évaluer l'élève : même si celui-ci sera considéré comme ayant fourni une réponse erronée, l'enseignant le plus souvent se rend bien compte qu'il y a autre chose dans le raisonnement de l'élève que ce qu'il souhaitait évaluer à l'aide de son exercice. L'élève, quant à lui, redoute les situations de malentendu au moins parce que la plupart du temps la responsabilité lui est attribuée - sa performance scolaire est jugée faible - et aussi parfois parce que le fait de ne pas comprendre les intentions de son enseignant et le sens de l'activité suscitent des émotions négatives, un sentiment d'échec, un manque de contrôle sur la situation, et l'empêche d'acquérir les savoirs enseignés.

Ces observations anecdotiques à l'occasion de la recherche ACI mettent en évidence, dans le détail, l'implication de facteurs sociaux dans la question de l'apprentissage. Le problème que soulèvent ces observations est désormais le suivant : comment tenir compte *du social* dans les processus cognitifs, dans le détail et en lien avec les multiples spécificités des situations singulières que les élèves rencontrent en milieu scolaire ?

Une piste prometteuse consiste à s'intéresser aux processus de communication. L'intérêt d'une approche basée sur l'étude de la communication pour comprendre les processus et enjeux du système scolaire a été soulignée il y a longtemps (Perret-Clermont, 1976). Dans le contexte de l'époque, Perret-Clermont dénonçait une sur-évaluation, dans les travaux portant sur les problématiques d'éducation comme l'échec scolaire, des facteurs psychologiques - c'est-à-dire attribués aux personnes en tant que propriété idiosyncratiques - et sociologiques - également attribués aux personnes en fin de compte, via l'appartenance à un groupe ou à une classe sociale. Ce réductionnisme des différences entre enfants à des différences psychologiques, toujours selon Perret-Clermont (1976), a pour conséquence d'éviter "par là de tenir compte

de la spécificité des systèmes de relations sociales et de communication qu'elle [l'école] met en jeu dans son mode propre de fonctionnement" (p. 3). Notre approche de l'attribution des connaissances - ou des conceptions - à travers la notion de malentendu reprend la même hypothèse à charge, mais en soulevant le problème concret de sa mise en œuvre dans une recherche en milieu scolaire : comment peut-on tenir compte *du social* dans les processus cognitifs et en milieu scolaire, relativement à l'action d'élèves singuliers en situation et à l'acquisition de savoirs disciplinaires particuliers ?

Inhelder et al. (1992) fournissent les bases d'un tel programme de recherche :

> *Cette orientation nouvelle implique que les conduite cognitives elles-mêmes ne sont plus, ou pas toujours, du même type que celles qui retenaient l'attention dans l'étude du sujet épistémique. De fait, elles sont hors du champ épistémologique et psychologique que Piaget s'était assigné. En effet, on ne s'attache plus à étudier la construction des grandes notions constitutives de notre connaissance du réel, à décrire les organisations structurales propres à ces différents domaines épistémiques, mais à mettre en évidence des procédures dont l'élaboration s'effectue dans des contextes pratiques ordinaires et permet de poser des questions du type suivant : Comment l'enfant donne-t-il un sens à la tâche ? Comment s'effectue le choix et la spécification des instruments de connaissance ? Existe-t-il des représentations différentes et diversement adéquates aux situations ? Comment contrôle-t-il la pertinence de ses démarches ?*
>
> *(Inhelder et al., 1992, p. 22)*

Pour cette démarche de recherche, l'étude des "déséquilibres" est indiquée par les chercheurs comme particulièrement féconde, à l'occasion d'une discussion du *fonctionnalisme* en psychologie :

> *Il y a deux manières d'envisager le fonctionnalisme en psychologie. La première... (...)*
> *Par contre, si l'on s'attache à étudier la fonction des conduites cognitives dans le cas de "désadaptations" (Claparède) ou de "déséquilibres" (Piaget), on s'ouvre à une étude extrêmement riche des processus fonctionnels très précis par lesquels un sujet se réadapte à une situation qui a suscité la désadaptation.*
>
> *(Inhelder et al., 1992, p. 29)*

Ce constat est à l'origine du choix de s'intéresser dans cette recherche au phénomène des malentendus, qui peut être considéré comme un déséquilibre de l'intercompréhension entre enseignant et élèves et permet une investigation des discours par lesquels sont médiatisés les processus d'apprentissage et l'enseignement en milieu scolaire.

Cette démarche de recherche permet de faire le lien entre épistémologie génétique, orientée sur les structures générales de la pensée, et psychologie des situations singulières. Dans cet état d'esprit, la "structure" piagétienne est considérée comme le champ des possibles (Inhelder et al., 1992, p. 33), et la recherche en micro-genèse comme l'étude singulière de l'adaptation d'un individu à une situation. À partir de ce programme de recherche, il devient possible de prendre en compte les *points de vue* des sujets et leurs divergences dans une approche psychologique de leurs activités d'adaptation.

Cette recherche nous mène cependant au-delà des travaux cités, parce qu'elle s'intéresse aux adaptations des élèves aux discours et par les discours, dans un milieu naturel où les points de vue ne sont pas isolés expérimentalement : il faudra donc systématiquement se poser la question "*pour qui ?*" à chaque fois que nous examinerons le sens que prennent ces discours lors des analyses.

Cette prise en compte des points de vue singuliers a déjà attiré l'attention de travaux de recherche en didactique des mathématiques (voir p.ex. : Margolinas, 2004), en complément de la *théorie des situations didactique* de Brousseau (1998/2004), mais elle est loin d'être utilisée systématiquement et conduit à des difficultés méthodologiques importantes[9]. En effet, si je m'appuie sur les réflexions générales que permet cette théorie pour appréhender la complexité des situations en milieu scolaire, et j'y ferai référence plusieurs fois, sa mise en œuvre stricte à partir du modèle mathématique de la *théorie des jeux* me semble hors de portée pour le sujet qui est le mien ici. En outre, je ne suis pas sûr que la formalisation des situations constitue la démarche la plus féconde pour prendre en compte de manière différenciée les points de vue et leurs rapports respectifs, comme je l'argumente plus tard dans cette recherche.

En outre, le chercheur dispose également d'un point de vue, qu'il convient de traiter comme tel sans lui donner *a priori* un autre statut que celui des points de vue qu'il étudie, comme le souligne Edgar Morin dans ce passage :

> *Dès lors, nous pouvons formuler le principe de la réintégration du concepteur dans la conception : la théorie, quelle qu'elle soit et de quoi qu'il s'agisse, doit rendre compte de ce qui rend possible la production de cette théorie elle-même, et si elle ne peut en rendre compte, elle doit savoir que le problème demeure posé.*
>
> *(Morin, 1982/1990, p. 173)*

La spécificité du point de vue du chercheur, cependant, consiste à ce qu'il puisse se construire progressivement et le plus explicitement possible, à l'aide d'un cadre théorique et d'un ensemble de références qui le coordonne aux points de vue d'autres chercheurs. Je prêterai particulièrement attention à cette explicitation de mon point de vue et de mon activité de théorisation au fil de la recherche.

Je prendrai également soin de poser systématiquement la question, pour toutes les affirmations émises *de mon point de vue de chercheur* : " *pour qui ?*", au sens de "*de quel point de vue suis-je en train de proposer une reconstruction ?*"

Ainsi, cette recherche tente de passer du constat de l'importance *du social* dans la pensée, l'apprentissage et le développement cognitif (Perret-Clermont, 1979) à la prise en compte concrète et détaillée des *points de vue* des élèves engagés dans des activités de didactique des sciences en milieu scolaire, de

9. Malgré la convergence du travail cité de Margolinas avec mon objet d'étude, le fait que je n'ai découvert ce travail qu'une fois cette recherche entamée et la référence à la *situation* comme si elle était déterminée (*didactique*, *adidactique* ou encore *nildidactique*) indépendamment des points de vue, justement, m'a conduit à poursuivre la construction d'une autre perspective sur le phénomène des malentendus, et ce malgré la convergence des observations discutées dans ce travail avec l'objet de cette recherche. Brousseau (1998/2004), pourtant, précise qu'une situation peut ête perçue comme *adidactique* pour un élève et *didactique* par un autre.

manière à pouvoir fournir une description de leurs divergences *du point de vue du chercheur*, c'est-à-dire dans une perspective scientifique.

Dans cet objectif, les prochains chapitres servent à construire une telle perspectives, avant de l'essayer dans une recherche empirique visant à identifier et décrire des *situations de malentendu*.

1.3 Le plan du document : mise en forme

Cette section présente le plan du document, la mise en forme de la recherche. Il permet une vue d'ensemble pour s'orienter sur des parties spécifiques, sans fournir l'argumentation des propos, développée au fil des chapitres.

La problématisation du chapitre 2 prend comme point de départ un débat quant aux conceptions de la physique que les chercheurs de psychologie cognitive attribuent aux élèves, pour proposer une reconceptualisation du débat sur le fonctionnement cognitif individuel des élèves qui prenne en compte le processus de communication entre élèves et enseignants, et entre participants à une recherche et chercheurs. Ce processus de communication est abordé à travers l'étude de ses accidents, c'est-à-dire à travers le phénomène de malentendu.

Une conséquence de cette réinterprétation de certaines des difficultés des élèves consiste à mettre en évidence le potentiel d'action des enseignants en situation d'enseignement pour répondre ou anticiper les difficultés des élèves à apprendre la physique. En effet, attribuer les difficultés à des conceptions individuelles place *de facto* le problème hors de la classe et hors d'atteinte d'une pratique d'enseignement, puisque ces conceptions sont considérées comme antérieures aux situations d'apprentissage en classe, alors qu'une explication des difficultés centrées sur les processus communicatifs mis en œuvre en situation d'apprentissage en milieu scolaire, si elle se révèle probante, permet aux enseignants d'agir *hic et nunc* et la classe de sciences redevient le lieu privilégié pour résoudre le "problème" de la difficulté de l'apprentissage des sciences.

Je tenterai de montrer, dans un intermède épistémologique au milieu du chapitre 2 qui met en évidence le problème de l'*échelle d'observation*, que si les comportements des élèves peuvent s'expliquer par des processus de communication ayant lieu au moment même de l'enseignement ou de la recherche, il n'est pas nécessaire de faire des inférences sur les *conceptions* dont disposeraient individuellement les élèves avant de s'engager à réfléchir dans ces situations. J'argumenterai pour la prise en compte différenciée des points de vue en psychologie, à laquelle peut contribuer une *épistémologie perspectiviste* en offrant la possibilité de coordonner plusieurs approches scientifiques sur un même phénomène, dans une transdisciplinarité qui permet la prise en compte des points de vue des acteurs par les chercheurs.

Dans cette recherche, je fais le *pari*[10] qu'il est possible d'identifier des *situations de malentendu* dans des activités de didactique des sciences. Cependant, l'identification et la description de ces situations nécessitent des outils théoriques spécifiques pour étudier les processus de communication de manière à reconstruire *de manière différenciée* le sens que les élèves et l'enseignant donnent aux objets de pensée et aux discours. Il s'agit de s'intéresser aux *relations* entre les représentations forgées dans les discours et les activités selon les divers *points de vue*, en traitant le cognitif et le langage comme interdépendants.

10. Pour une énonciation plus précise du pari intellectuel, voir la section 3.4, p. 221 et suivantes.

Après une brève présentation des recherches sur la question du malentendu, je propose au chapitre 3 une collection d'approches psychologiques de l'apprentissage qui convergent avec les objectifs d'une recherche centrée sur les *situations de malentendu* en milieu scolaire. Ce sera l'occasion d'aborder des approches psychosociales, socio-cognitive et historico-culturelles de l'apprentissage, qui s'intéressent aux processus situés et partagés qui prennent place en milieu scolaire : interactions sociales, construction d'une intersubjectivité, dynamiques des systèmes et processus de communication et d'interprétation. Ces approches esquissent une perspective intégrative dont j'argumenterai la cohérence et la pertinence pour cette recherche, et permettent une définition opérationnelle des *situations de malentendu* et la formulation précise de la question de recherche.

Cette recherche devrait donc permettre d'évaluer la pertinence du concept de *situation de malentendu*, notamment en tant qu'explication alternative ou complémentaire à celle donnée dans la littérature en termes de conceptions individuelles, en l'exerçant dans l'analyse de traces empiriques documentant les conceptions des élèves en physique et issues d'une étude de cas. Dans ce but, cette recherche s'intéresse en particulier à l'apprentissage de la physique, et au sein de la physique à la *mécanique newtonienne*, figurant parmi les exemples de savoirs à enseigner les plus difficiles [11]. Toujours dans ce but, les traces ont été recueillies lors d'une séquence d'enseignement donnant une grande place aux interventions orales et écrites des élèves pendant les activités, de manière à disposer des indices permettant la reconstruction de leurs points de vue au fil de la séquence. Cette séquence fait l'objet d'une double ingénierie didactique, présentée au chapitre 4.

Il s'agit donc de décrire la situation dans laquelle les élèves s'approprient des éléments de connaissance, de manière à ce que l'état de relative confusion de ces éléments utilisés par les élèves ne s'explique pas seulement par des conceptions individuelles fragmentaires mais aussi par les processus de communication. De tels processus de communication incluent la structuration des connaissances effectuées au fil de l'histoire, relativement à la culture, à la société ou communauté, et à l'institution dans laquelle les activités se déroulent. Examiner de tels processus de communication ne vise pas une critique de l'école, mais bien plutôt à mettre en évidence la complexité des activités de didactique des sciences dans lesquelles travaillent enseignants et élèves, complexité qui va de pair avec la grande créativité des individus lorsqu'il s'agit de donner du sens à leur activité, et d'interpréter le discours et les interactions sociales dans lesquels ils s'engagent. Les explications méthodologiques de cette démarche descriptive sont fournies au chapitre 5, et les résultats au chapitre 6.

Le cadre théorique des analyses a été construit dans le but de permettre une telle approche du cognitif, du langage et de ses usages. Les analyses des productions écrites et orales des élèves et de l'enseignant et des documents utilisés pour l'enseignement visent donc à identifier et décrire les *divergences* et les ressemblances entre le sens donné aux tâches et aux connaissances de mécanique par les élèves et par l'enseignant à différents moments. Si les analyses effectuées des traces laissées par les élèves et l'enseignant permettent

11. Les recherches qui mettent en évidence la difficulté de l'apprentissage de la mécanique newtonienne sont trop nombreuses pour être toutes citées, mais en voici quelques exemples : Driver, Guesne, & Tiberghien, 1985 ; McCloskey, 1983 ; Pauen, 1996 ; Reiner, Slotta, & Chi, 2000 ; Tiberghien, 1989a, 2003 ; Tiberghien & Weil-Barais, 1987 ; Trowbridge & McDermott, 1980 ; Viennot, 1978, 1989a, 1996 ; Weil-Barais & Vergnaud, 1990 ; Wilkening & Huber, 2002.

de donner une description des situations de malentendu identifiées comme résultant d'un processus de communication, somme toute assez banal, je considérerai le *pari intellectuel* de cette recherche *réussi*. Si, en outre, les *situations de malentendu* ainsi ramenées à un processus de communication permettent en plus de rendre compte de ce qui apparaît dans la littérature comme des conceptions individuelles des élèves antérieures à l'instruction scolaire, je considérerai l'approche théorique et méthodologique proposée dans cette recherche comme une hypothèse explicative alternative au modèle dominant des sciences cognitives. Mon positionnement sur ces questions, compte tenu du travail empirique, est présenté au chapitre 7.

Première partie

Problématique

Nos recherches précédentes avaient mis en évidence le rôle des interactions sociales pour l'acquisition de structures opératoires. La prise en considération d'objets d'apprentissage plus culturels (représentations dans le dessin, formulations d'opérations mathématiques) attire l'attention du chercheur sur le rôle des processus de communication dans le développement de ces conduites cognitives. Ni la représentation graphique, ni l'activité mathématique ne peuvent être expliquées uniquement par le développement des possibilités opératoires des sujets. Sans doute serait-il heuristique alors de les considérer aussi comme des langages - inscrits dans des réseaux de communication et instruments de ceux-ci - langages dont l'existence requiert de l'enfant d'élaborer des capacités à y recourir. Les conditions psycho-sociales dans lesquelles l'enfant doit recourir à ces langages détermineraient, en partie, les qualités de l'appropriation qu'il en fait. Quelle sont les implications pédagogiques ?

(Perret-Clermont, 1980, p. 7)

Chapitre 2

Le problème de l'apprentissage des sciences

Dans ce chapitre, je vais présenter les raisons qui m'ont conduit à problématiser l'apprentissage en milieu scolaire à travers le concept de *situation de malentendu*[12]. Je discuterai des approches de l'apprentissage des sciences qui en font un problème de *conceptions individuelles*, pour ensuite mettre en évidence les taches aveugles de cette problématisation désormais classique dans la littérature en psychologie, et proposer une reconceptualisation des processus d'apprentissage prenant en compte les situations singulières, qui impliquent certes des individus, mais aussi des processus et systèmes culturels, sociaux, sémiotiques et matériels.

Je commencerai par aborder une approche qui regroupe de très nombreux travaux de recherche, et qui est centrée sur le *changement conceptuel* des apprenants en sciences. Les résultats mis en évidence par cette approche soulèvent des difficultés importantes, tant pour les élèves engagés dans l'apprentissage que pour les chercheurs dans leurs efforts de théorisation des processus d'apprentissage. Après un intermède épistémologique, qui permet de *poser le problème* d'une *échelle* en psychologie et pour cette recherche, je tenterai de souligner les apports et les limites des approches centrées sur les conceptions individuelles pour investiguer l'apprentissage des sciences. Le but de cet intermède consiste à prendre distance avec les habitudes des travaux de recherche pour se donner les moyens d'explorer de nouvelles pistes.

Les enjeux épistémologiques discutés invitent à une reconceptualisation de la question de l'apprentissage des sciences, que je propose de centrer sur l'identification et la description de *situations de malentendu*. Ces situations fournissent l'unité d'analyse permettant d'investiguer les difficultés que des élèves particuliers rencontrent dans leur milieu scolaire spécifique, à un moment précis de l'histoire de leur apprentissage de la physique. Les approches qui permettent d'aborder les processus d'apprentissage à l'échelon d'une *situation* sont brièvement évoquées au chapitre suivant, qui a pour objectif d'esquisser une approche de la complexité qui interpelle des éléments spécifiques au cadre, conditions et ressources sémiotiques et matérielles des activités de didactique des sciences et des processus psychosociaux qui s'y déroulent, en abordant les questions cognitives sans se restreindre à la seule considération des individus et de leurs caractéristiques.

12. La définition est construite progressivement au cours des deux premiers chapitres, et se trouve dans la section 3.4.1, p. 222 et suivantes. Au besoin, veuillez vous reporter au glossaire p. 793 et suivantes.

Sommaire

2.1 Des conceptions individuelles aux *situations de malentendu* . . . 27
2.1.1 Préambule . . . 27
2.1.2 Émergence d'une problématique . . . 28
2.1.3 Quelques repères dans la littérature sur les *conceptions* en science . . . 31
2.1.4 Exemples choisis de divergences théoriques . . . 32
2.1.5 Quelques remises en question des *conceptions* . . . 38
2.1.6 Synthèse : un problème de théorisation . . . 43
2.2 Intermède épistémologique . . . 45
2.2.1 Introduire une échelle en psychologie . . . 45
2.2.1.1 Il y a un problème d'échelle . . . 45
2.2.1.2 Quelques éléments en vue d'une échelle en psychologie . . . 47
2.2.1.3 Les apports d'une échelle explicite . . . 50
2.2.1.4 Synthèse : un objet de recherche qui risque d'échapper au regard . . . 56
2.2.2 Une épistémologie perspectiviste . . . 57
2.2.2.1 Rapports entre les questions ontologiques et épistémologiques . . . 58
2.2.2.2 L'importance du choix d'un échelon dans la recherche . . . 60
2.3 Aborder l'apprentissage par les *situations de malentendu* . . . 63
2.3.1 Vers une résolution du débat sur les *conceptions* . . . 63
2.3.1.1 Au-delà d'un constat d'incommensurabilité . . . 63
2.3.1.2 Différenciations des points de vue quant aux connaissances/savoirs . . . 64
2.3.1.3 Envisager la possibilité de *malentendus* . . . 68
2.3.1.4 Un hôte indésirable de la méthodologie de recherche ? . . . 69
2.3.1.5 Temps et durée dans les perspectives sur les conceptions . . . 71
2.3.1.6 Du "débat insoluble" à la construction d'une nouvelle perspective . . . 73
2.3.2 Une nouvelle perspective . . . 75
2.3.2.1 Introduction . . . 75
2.3.2.2 Différenciation épistémique : perspective, savoir et connaissance . . . 78
2.3.2.3 Le choix de la focale : les échelons à observer . . . 82
2.3.2.4 Décrire des points de vue singuliers : la question du *sens* . . . 83
2.3.2.5 Décrire des points de vue en construction et en transformation : la question de *l'argumentation* . . . 84
2.3.2.6 Décrire des points de vue en interaction les uns avec les autres : la question de *l'interprétation* . . . 86
2.3.2.7 Comparer des points de vue divergents : la question de la *situation* . . . 88
2.3.2.8 Synthèse . . . 90

2.1 Des conceptions individuelles aux *situations de malentendu*

2.1.1 Préambule

Dans l'état de la littérature de recherche sur l'apprentissage des sciences naturelles en milieu scolaire au début de cette recherche[13], le phénomène des conceptions des élèves avant *et après* leur scolarité est considéré depuis plusieurs décennies comme l'un des écueils les plus importants dans l'apprentissage des sciences (voir p.ex. : Driver et al., 1985 ; Giordan & Girault, 1994 ; Larochelle & Désautels, 1992 ; Tiberghien, 2003 ; Welford, Osborne, & Scott, 1996). Malgré de nombreuses approches théoriques visant à l'expliquer ou le décrire (voir p.ex. : Lautrey, Rémi-Giraud, Sander, & Tiberghien, 2008), le phénomène des conceptions[14] des apprenants préalables à l'enseignement n'a cessé de surprendre les chercheurs. Ces conceptions sont le plus souvent abordées par les chercheurs comme des représentations mentales, ou des modes de raisonnement *individuels* et stables au cours du temps.

Dans cette section, je discute quelques recherches abordant l'apprentissage des sciences de la nature en se focalisant sur les conceptions des apprenants, afin de problématiser dans les grandes lignes les orientations prises par la recherche dans ce domaine. Toute tentative de raconter l'histoire de la recherche est évidemment tributaire de certains choix, qui en limitent l'objectivité, mais présentent aussi l'avantage de mettre en évidence certains aspects, que d'autres éclairages ont peut-être laissés dans l'ombre. Le but de cette section n'est donc pas de représenter la littérature avec le plus d'exhaustivité possible, ce qui est déjà disponible[15], mais plutôt de problématiser à travers l'examen de quelques recherches importantes les enjeux et difficultés de l'étude scientifique de l'apprentissage des sciences.

L'éclairage choisi pour cette problématisation d'un champ de recherche s'oriente sur un axe qui part d'une perspective classique en psychologie centrée sur les individus et les conceptions des apprenants, pour se développer dans le sens d'une plus grande prise en compte de la complexité des processus d'apprentissage, à partir de la perspective socio-cognitive du développement cognitif de l'enfant et de l'apprentissage scolaire (voir p.ex. : Carugati & Perret-Clermont, 2015). Cette perspective a non seulement mis en évidence l'importance *du social*[16] dans l'apprentissage, mais aussi ouvert un nouveau champ de recherche, centré notamment sur les pratiques de l'argumentation dans les activités d'apprentissage des sciences.

13. Remarque : cette recherche ayant débuté en 2005, la problématique qui en constitue le point de départ est forcément relative à l'état de la littérature à ce moment-là.

14. D'autres termes sont utilisés dans la littérature, selon les approches, par exemple *(pré)conceptions* des élèves, ou encore *misconceptions* en anglais.

15. Voir par exemple le rapport Eurydice, 2006.

16. Cette expression un peu vague peut donner lieu à des interprétations variées, allant d'un sens "faible" du terme "importance" où le social est intégré à la théorisation comme un facteur à prendre en compte dans les modèles statistiques, à un sens "fort" où les phénomènes relatifs à la pensée ne peuvent plus être sérieusement étudiés sans s'intéresser à leur genèse, long processus complexe auquel participent - notamment - des processus sociaux qu'un modèle théorique ne peut plus légitimement réduire à "un facteur" parmi d'autres. Dans cette interprétation, la psychologie cognitive ne peut plus se faire isolément d'autres psychologies, équipées pour aborder les phénomènes constitutifs du cognitif, notamment les processus sociaux et de communication. C'est à cette interprétation radicale de "l'importance du social" que cette recherche se rallie en étudiant l'apprentissage des élèves à travers des *situations de malentendu*.

D'autres approches psychologiques seront abordées après un intermède épistémologique, qui permet de soulever le problème d'échelle que pose la problématisation de l'apprentissage des sciences.

2.1.2 Émergence d'une problématique

La problématique des conceptions des élèves antérieures à l'instruction scolaire émerge des réflexions et recherches sur l'acquisition et la spécificité de la pensée scientifique. L'opposition amenée par Michel de Montaigne entre "tête bien faite" et "tête bien remplie" témoigne de l'ancienneté du débat pédagogique entre une instruction centrée sur des objets d'enseignement, voire même sur l'apprentissage par cœur de *représentations* ou *conceptions* conformes aux savoirs scientifiques d'une époque, et instruction centrée sur des processus dont l'appropriation par les élèves contribue à former des compétences (raisonnement, pensée critique, apprentissage auto-régulé, etc.).

Les premiers modèles pédagogiques se représentaient plutôt les élèves comme des individus semblables à des tablettes de cire à modeler selon les savoirs en vigueur, c'est-à-dire comme entrant à l'école dans une totale ignorance des matières scientifiques. Cette métaphore de la "tête vide" a été battue en brèche par de nombreux travaux, tout particulièrement durant le première moitié du XX^{ème} siècle, dont je rappelle quelques exemples ci-dessous pour mettre en évidence le fait que considérer les élèves comme arrivant à l'école avec leurs propres conceptions au sujet des matières scientifiques ne va pas de soi. La prise en compte d'un sens commun, ou plus généralement d'idées que les élèves ont pu construire avant ou en marge de leurs pratiques scolaires, marque indubitablement une avancée de la recherche sur l'apprentissage des sciences. Elle fournit également un des principaux arguments pour fonder les revendications d'une *pédagogie scientifique* par de nombreux auteurs (ou d'une *didactique psychologique* chez **?**, voir p.ex. :)]Aebli1951, basée sur une meilleure connaissance de ce sens commun et des conditions permettant l'apprentissage par les élèves.

Le sens commun, opposé aux savoirs scientifiques, est parfois considéré dans une forme de généralité théorique donnant l'illusion qu'il est identique pour tous. Il bénéficie néanmoins aujourd'hui d'une reconnaissance supplémentaire avec l'importance donnée - au moins dans les discours - aux pratiques de *différenciation pédagogique* (voir p.ex. : Meirieu, 1996). Il y a là une reconnaissance de l'individualité des élèves dont je ne remets pas en question la valeur éthique et praxéologique, à aucun moment dans cette recherche.

En outre, la prise en considération des points de vue des apprenants est tout particulièrement importante dans la formation des adultes (voir par exemple à ce sujet les travaux[17] de Schwartz & Lambrichs, 1994) qui présentent plusieurs exemples de solutions de formation d'adultes en vue d'une reconversion professionnelle. Cette pertinence praxéologique de la prise en considération des "conceptions" antérieures à une intervention pédagogique ou didactique ne fournit cependant pas de quoi trancher les débats théoriques quant à l'existence ou la nature de ces conceptions : nous pourrions tout aussi bien dire qu'il est important

17. Bertrand Schwartz décrit son travail exemplaire d'accompagnement des mineurs à Nancy, dont la profession disparaissait de la Lorraine.

de tenir compte du *point de vue* des apprenants que de leurs *conceptions*, ou encore qu'il s'agit de prendre en compte leur *biographie*, voire qu'il importe d'établir une *communication dialogique* entre formateurs et adultes en formation ; pourtant, chacune de ces notions renvoie à une théorisation fort différente des éventuels écueils dans les processus d'apprentissage des personnes concernées.

Ma problématique n'est pas d'ordre éthique, mais épistémique : si je remets en question l'attribution de la réussite des élèves aux tâches proposées à des conceptions individuelles, c'est uniquement dans le but de mieux comprendre ce qui rend l'apprentissage des sciences difficile, et non pas pour nier l'individualité des élèves dont la reconnaissance par l'enseignant contribue effectivement à faciliter l'apprentissage des élèves. Je conteste, cependant, que cette reconnaissance d'une individualité de l'élève ne puisse se faire *que* par l'attribution de propriétés aux individus[18] , et je tenterai d'argumenter ma position sur le plan théorique dans ce chapitre, et sur le plan empirique à travers l'ensemble de la recherche.

De nombreuses publications (voir p. ex. : Bliss & Weil-Barais, 1990 ; Da Silva, 2004) retracent en détail l'histoire des recherches sur l'enseignement des sciences. Le problème des conceptions des apprenants bénéficie également de plusieurs bonnes synthèses, que ce soit en anglais (Welford et al., 1996) ou en français (Giordan, Girault, & Clément, 1994 ; Larochelle & Désautels, 1992 ; Tiberghien, 2003). Cette problématique est cependant bien plus ancienne, puisqu'elle est déjà discutée dans des œuvres fondatrices comme celles de Vygotski (1934/1997) de Bachelard (1938/1972) ou de Dewey (1938/1993).

Vygostki met en évidence, au sujet de *la formation des concepts* en sciences, combien le *concept scientifique* est éloigné de la *pensée quotidienne* des enfants (Vygotsky, 1934/1986). Bachelard (1938/1972) avance l'idée que "c'est en terme d'obstacles qu'il faut poser le problème de la connaissance scientifique" (p. 13). Cette posture le conduit à proposer de rectifier l'expérience première des enfants pour enseigner les sciences, et à introduire la notion d'*obstacle épistémologique* dans sa théorie.

Dewey (1938/1993) invite ses lecteurs à se pencher sur "le lien organique entre éducation et expérience personnelle" ("the organic connection between education and personal experience", p. 8) pour relever les défis de l'éducation nouvelle, qui ne serait justement pas pure imposition des manières de faire et de penser des générations antérieures aux plus jeunes générations, mais une imitation de la démarche expérimentale [19] dans le rapport à l'expérience vécue.

Les travaux de Piaget qui décrivent soigneusement les réponses des enfants de tout âge sur des questions liées à la nature, à la physique, au temps et aux mathématiques (par exemple Piaget, 1927, 1937/1967b, 1945/1978, 1946, 1972a) constituent évidemment aussi l'une des origines des approches s'intéressant aux conceptions des élèves. Ces travaux de l'équipe de recherche autour de Piaget ont eu un impact important

18. Les nombreuses attributions d'étiquettes cliniques ("dys-", "TDA", "haut potentiel" etc.) observées dans le milieu éducatif suisse, par exemple, sont malheureusement souvent comprises comme de prétendus descripteurs des propriétés de l'enfant par les profanes (parents, politiciens, etc.), et même parfois par les enseignants, alors qu'elles ne constituent, dans le meilleur des cas, que des catégories fonctionnelles d'identification de troubles spécifiques pour les experts que sont les psychologues et logopédistes, utilisées dans le but d'orienter les mesures d'aide et sans aucune prétention d'attribution de caractéristiques à des individus.

19. Le format de la construction de connaissances scientifiques proposé par l'auteur est celui de l'enquête, sur lequel je reviendrai au moment de définir le concept de situation, section 3.4.1, p. 222 et suivantes.

sur la recherche (L. Smith, 1992), peut-être plus pour leur qualité descriptive que pour les propositions théoriques de Piaget : le fait de retrouver dans ces livres des retranscriptions détaillées des opinions exprimées par les enfants lors des entretiens a fait prendre conscience aux chercheurs des représentations souvent inattendues - voire saugrenues - que les enfants exprimaient sur les questions scientifiques. La théorisation de ces discours d'enfants, produits à l'occasion d'entretiens très spécifiques, fait néanmoins débat (voir p.ex. : Nicolet, Grossen, & Perret-Clermont, 1988 ; Perret-Clermont & Nicolet, 1988 ; Perret-Clermont et al., 1990) : s'agit-il vraiment de leurs *représentations* du monde, ou plutôt de réponses données par les enfants à l'adulte dans le but de répondre à ses attentes et à celles de la situation sociale un peu étrange que construit l'entretien de recherche ? Si les réponses d'enfants ne sont peut-être plus les mêmes aujourd'hui en Suisse romande qu'au moment des recherches de Piaget, cela ne signifie pas forcément qu'il faut remettre en question la théorie piagétienne pour ce qui est du fonctionnement cognitif humain, car une autre hypothèse peut être avancée : et si les réponses des enfants consistaient en la répétition de discours que les adultes leur adressaient à cette époque historique où les adultes fournissaient souvent aux enfants des explications spécifiquement destinées à leur âge, en partant du principe que le discours scientifique leur était incompréhensible ?

À la suite des citations directes de discours d'enfants que Piaget et ses collaboratrices et collaborateurs ont publié dans leurs ouvrages, de nombreux auteurs s'intéressent aux conceptions des élèves antérieures à l'instruction scolaire, que ce soit dans la filiation cognitiviste centrée sur les *images mentales* ou *modèles mentaux* (pour une revue de littérature, voir p.ex. : Scholnick, Nelson, Gelman, & Miller, 1999) ou dans une psychologie du développement cognitif (voir p.ex. : Howe, Tolmie, Greer, & Mackenzie, 1995 ; Pauen & Wilkening, 1997 ; Tolmie, Howe, Mackenzie, & Greer, 1993 ; Weil-Barais & Lemeignan, 1990 ; Wilkening & Huber, 2002 ; Wilkening & Lamsfuss, 1993). Aebli (1951), faisait déjà le lien entre le concept d'*images mentales* de Piaget et celui de *conceptions* d'autres courants de la psychologie lors de son analyse des résultats psychologiques de l'enseignement traditionnel. Malgré l'intérêt commun pour les conceptions des élèves, la manière dont les *représentations* ou *conceptions* des élèves sont abordées dans ces recherches varie d'une recherche à l'autre. Je fournis quelques exemples qui illustrent ce point à la section suivante.

Lautrey et al. (2008) offrent une analyse détaillée de la diversité des recherches et de l'évolution des théories concernant les "connaissances naïves" des élèves, et montrent que le "cognitivisme développemental a donné des connaissances naïves des enfants un tableau très différent de celui que Piaget avait esquissé un demi-siècle plus tôt."(p. 17). Les auteurs mettent ces divergences sur le compte du tournant cognitiviste que prend la psychologie dans la seconde moitié du $XX^{ème}$ siècle.

Je reprends cette analyse et tenterai de montrer dans la suite du chapitre, et sur quelques points particuliers, que les divergences d'interprétation quant à la réalité des "connaissances naïves" des enfants relèvent de divergences dans la théorisation de l'apprentissage - souvent de manière implicite - et que ces divergences théoriques prennent l'ascendant sur la question des "résultats" des recherches, c'est-à-dire sur les savoirs que les recherches permettent effectivement d'établir empiriquement. Une conséquence visible de cette ascendance de la théorisation sur l'interprétation des observations des chercheurs apparaît sous la forme de débats insolubles qui émergent entre tenants de l'une ou l'autre théorisation : les chercheurs ne

peuvent plus s'accorder sur le sens des résultats de recherche de leurs études respectives, du moment que les divergences se situent justement au niveau des postulats théoriques auxquels ils ont souscrits avant même d'organiser une démarche de recherche, et non pas au niveau de l'interprétation des observations effectuées. En effet, de telles divergences ne peuvent être résolues par un débat sur l'interprétation des données de recherches ou d'observations effectuées dans le cadre d'approches théoriques incommensurables [20].

2.1.3 Quelques repères dans la littérature sur les *conceptions* en science

Parmi les nombreux courants de recherche intéressés aux *conceptions* des apprenants, il est notamment possible de distinguer une tradition de recherche francophone, à laquelle je me référerai sous le nom de *didactique des sciences* (parmi les premiers travaux, voir p.ex. : Brousseau, 1983 ; Cauzinille-Marmèche, Mathieu, & Weil-Barais, 1983/1985 ; Chevallard, 1985 ; Giordan, 1983 ; Halbwachs, 1975 ; Johsua & Johsua, 1988 ; Martinand, Host, Paulin, & Alemanni, 1980 ; Tiberghien, 1989a ; Vergnaud, Halbwachs, & Rouchier, 1978 ; Viennot, 1978, 1989b) et plusieurs traditions anglophones : après quelques travaux précurseurs (Driver, 1973 ; McCloskey, 1983 ; Trowbridge & McDermott, 1980), des courant de recherche plus spécialisés se constituent, par exemple autour du *conceptual change* (voir p.ex. : Carey, 1985, 1991 ; Dykstra, Boyle, & Monarch, 1992 ; Villani, 1992), ou des "modèles mentaux" *mental models* (voir p.ex. : Chi, 2000 ; Schauble, Glaser, Raghavan, & Reiner, 1991). D'autres recherches abordent davantage la dimension pédagogique et praxéologique de l'enseignement des sciences à l'école(pour une revue de littérature, voir p.ex. : Welford et al., 1996).

Les travaux de recherche centrés sur les *conceptions* des apprenants ont montré que certaines conceptions apparaissent régulièrement en réponse à une question ou une tâche, et chez une part importante des participants. Parallèlement, ces travaux montrent que ces conceptions résistent à l'enseignement, soit qu'on les retrouve identiques après une instruction scolaire sur le sujet, soit qu'elles co-existent avec d'autres réponses, plus proches des attentes de l'école. Pour Giordan et al. (1994, p. 9), "les travaux sur les conceptions montrent par exemple que des individus qui ont atteint des niveaux très développés d'abstraction dans des domaines formels, peuvent fonctionner comme des enfants sur des contenus scientifiques spécifiques".

Ces recherches documentent des questions adressées aux élèves ou étudiants en sciences dont on peut prédire, avec une étonnante stabilité, une proportion de réponses erronées bien spécifique (pour des exemples précis en français, voir p.ex. : Courtillot & Ruffenach, 2006 ; Larochelle & Désautels, 1992 ; Viennot, 1996). Ces résultats concernent la scolarisation aussi sur le long terme, puisqu'elles peuvent s'observer aussi chez les adultes ayant suivi les plus longues études (Driver, Leach, Scott, & Wood-Robinson, 1994). La robustesse de la stabilité de ces observations a été constatée *entre les recherches* adressant aux élèves un ensemble de questions semblables, alors que ces recherches s'intéressent rarement à la stabilité des réponses *par élève*, par exemple au sujet de questions différentes, ou même au cours du temps (pour un exemple de recherche longitudinale qui montre des conceptions moins cohérentes que prévues, voir D. B. Clark, 2006).

20. Terme utilisé ici au sens de T. S. Kuhn (1962).

Pour la majorité des auteurs de cette littérature, l'explication - parfois implicite - de ce phénomène repose sur l'idée que les élèves conceptualisent à leur manière les phénomènes avec lesquels ils interagissent quotidiennement, avant d'entrer en classe de sciences, et que ces premières conceptions sont autant d'obstacles aux apprentissages scolaires des matières scientifiques. Cependant, la manière dont les auteurs définissent de telles *conceptions* varie grandement selon les publications.

Pour les synthèses de ces recherches sur les conceptions, il existe en anglais notamment quelques revues de littérature des courants américains (Donovan & Bransford, 2005 ; Donovan, Bransford, & Pellegrino, 2000), et des revues plus internationales, par exemple celle de Welford et al. (1996) qui est orientée sur les *Science Education*, ou celle de Sawyer (2006b), orientée sur les *Learning Sciences*, terme apparu plus récemment. La théorisation de l'apprentissage y est néanmoins rarement abordée, la dimension empirique des travaux de recherche dominant largement dans ces publications [21]. Les synthèses en français sont principalement issues du champ de la didactique [22] des sciences (voir p.ex. : Giordan & de Vecchi, 1990 ; Lafortune, Deaudelin, & Doudin, 2004 ; Tiberghien, 2003 ; Viennot, 1996), et ainsi davantage orientées vers l'usage des travaux de recherche en milieu éducatif. En outre, Lautrey et al. (2008) posent le problème des conceptions en psychologie, et Vergnaud (1990) propose une véritable théorie de l'apprentissage conceptuel, ancrée dans la psychologie piagétienne.

L'article de White (1993) constitue l'une des rares mises en discussion et confrontation de ces divers courants, dans le but de concevoir une approche pédagogique prenant appui sur les résultats de recherche. Ces auteurs optent pour une approche de l'apprentissage centrée sur la construction de modèles causaux chez les apprenants, par opposition à une pédagogie visant la résolution de problèmes quantitatifs bien définis. Nous y reviendrons au moment de discuter de l'approche pédagogique, au chapitre 4.

Pour représenter la diversité de ces travaux concernant la question des conceptions des élèves, je ne discute que quelques exemples choisis dans diverses traditions de recherche, dans le but d'illustrer que les divergences relèvent plutôt de choix théoriques - en particulier de *postulats* fondamentaux aux approches théoriques - que de divergences quant aux interprétations des observations effectuées par ces recherches.

2.1.4 Exemples choisis de divergences théoriques

Un débat en particulier émerge de la littérature dans une discussion sans issue, reconnue quelques années plus tard par plusieurs chercheurs - dont un des principaux protagonistes du débat - pour n'être qu'un *faux problème* (diSessa, Gillespie, & Esterly, 2004 ; Ozdemir & Clark, 2007 ; Sawyer, 2006a). Ce débat oppose la théorie du "changement conceptuel" ou "theory change" (voir p.ex. : Ioannides & Vosniadou, 2002 ;

21. À toute généralité de ce genre s'oppose quelques contre-exemples, ici par exemple l'article de Reiner et al. (2000) qui propose une hypothèse explicative d'une série de "misconceptions" en physique : un schéma de pensée centré sur l'existence de la substance.

22. Cette formulation au singulier et un peu trop simple, ne présume pas que tous ces travaux partagent effectivement une théorie commune.

Vosniadou, 1994) à une théorie de l'acquisition des connaissances/savoirs [23] par les élèves par "fragments" ou "pièces" éparses ("knowledge-in-pieces") (voir p.ex. : diSessa, 1993b ; diSessa & Sherin, 1998).

Dans son article *Towards an Epistemology of Physics*, diSessa (1993b) propose une théorie qui représente la connaissance en physique comme un constituant d'abord un système de connaissances/savoirs peu organisé, établi progressivement à partir d'éléments isolés (*primitives* ou *p-prims*) directement liés aux perceptions ou du moins à l'expérience physique des sujets [24].

En retraçant l'histoire de ce débat, diSessa (2006) conclut que sa résolution requiert un développement théorique : "Settling the coherence/fragmentation dispute requires theory development. We need better cognitive models and more precise coordination between models and evidence." (p. 278). L'auteur propose de "meilleurs modèles cognitifs" et "une coordination plus précise entre les modèles et les observations". Si je m'accorde avec le constat d'un problème sur le plan théorique, la solution proposée me semble vouée à l'échec, parce que je ne pense pas que les protagonistes du débat aient manqué de précision ou de modèles cognitifs : à mon avis, ils se sont trouvés confrontés dans un débat en conséquence des postulats théoriques dont ils ont hérités de par les traditions intellectuelles des courants de recherche auxquels ils ont contribué. Cette hypothèse me vient de l'analyse de la genèse historique du débat, que j'esquisse très brièvement ci-dessous [25].

Les postulats théoriques des tenants du *changement conceptuel* - ou de la *cohérence* dans le développement des concepts - sont un héritage des postulats constructivistes et interactionnistes de Piaget : l'idée d'étudier le moment précis où les conceptions des élèves *changent* provient des recherches de l'équipe piagétienne mettant en évidence les *conflits cognitifs*, dans un premier temps, puis les *conflits socio-cognitifs* (Perret-Clermont, 1979), travaux dont le succès a été retentissant, non seulement chez les chercheurs mais aussi dans le milieu éducatif en général, mais qui ont aussi conduit à des malentendus.

Comme toute idée à succès subit des transformations dans sa transmission - et en particulier ici du fait que l'idée vulgarisée et générale d'un conflit entre les conceptions des uns et des autres dont les individus ressortent "grandis" d'une nouvelle conception - un raisonnement relativement simple s'est imposé consécutivement à ces recherches, et indépendamment des intentions des auteurs et du soin apporté à la mise en évidence expérimentale du phénomène et aux difficultés de son observation en milieu naturel (voir p.ex. : Perret-Clermont & Schubauer-Leoni, 1981). Ce raisonnement consiste à partir de l'idée du conflit (socio-)cognitif pour se représenter des élèves disposant de conceptions erronées dont il s'agit d'obtenir le changement, par conflit (socio-)cognitif, pour obtenir l'apprentissage que l'institution scolaire a pour mission de provoquer chez ces élèves (J. P. Smith, diSessa, & Roschelle, 1993). Il suffirait alors de mieux comprendre ce *changement conceptuel* pour non seulement mieux comprendre le processus d'apprentissage

23. Pour traduire l'anglais "knowledge", j'utiliserai "connaissance/savoir" jusqu'à introduire la distinction entre *connaissances* et *savoirs*, possible en français, dont je ferai usage dans cette recherche.

24. On retrouve ici les conséquences de la philosophie de la perception et de la connaissance empiriste si fortement ancrée dans la culture anglo-saxonne, qui représente l'acquisition de connaissances/savoirs par l'être humain comme l'impression de la réalité dans l'esprit ou, en termes actuels, comme une transmission d'*informations* de la réalité au cerveau.

25. La démonstration de cette idée nécessiterait évidemment le travail plus sérieux d'une histoire de la psychologie, que je n'ai malheureusement pas eu les moyens de réaliser.

des élèves (théoriquement concentré sur ce moment précis de basculement d'une conception à une autre) mais aussi pour pouvoir éventuellement le provoquer à l'aide d'une pédagogie adéquate.

Outre les difficultés, le passage entre l'observation par l'équipe piagétienne et les travaux néo-piagétiens d'un processus psychologique en situation de test à son observation en milieu scolaire (à ce sujet, voir p.ex. : Gilly, Roux, & Trognon, 1999 ; Perret-Clermont & Schubauer-Leoni, 1989 ; Schubauer-Leoni, Perret-Clermont, & Grossen, 1992), et du passage entre le *descriptif* de ces recherches et le *prescriptif* d'une approche pédagogique, ce raisonnement repose effectivement sur plusieurs postulats, notamment :

— que les *conceptions* des novices dans une discipline scientifique peuvent être traitées (théoriquement et empiriquement) comme les *concepts* des experts lors d'un processus de changement d'une *conception* à un *concept*, ce qui est l'un des points que contestent les opposants dans le débat, pour qui les conceptions n'ont pas le niveau de cohérence d'un concept expert ;

— qu'il y a une *continuité* dans le processus d'apprentissage d'une discipline scientifique, postulat qui justifie le besoin d'une explication pour le changement [26] et qui est hérité des postulats constructivistes et interactionnistes de l'épistémologie génétique [27] ;

— qu'*il y a* un *processus de construction* des connaissances/savoirs par les apprenants et que, par conséquent, ce processus peut être investigué en observant *les interactions d'un individu avec son milieu* pour mieux comprendre en quoi consiste l'apprentissage des sciences ; il s'agit ici d'un corollaire des postulats constructivistes et interactionnistes.

De l'autre côté, la théorie du *knowledge-in-pieces* rend mieux compte que les approches du *theory change* du fait que sous certains aspects les conceptions peuvent perdurer parallèlement aux apprentissages scolaires dans le système cognitif des apprenants, ce qui est difficile à expliquer si chaque individu n'utilisait qu'une seule théorie cohérente dans un domaine donné. Cependant, le *knowledge-in-pieces* rencontre également des difficultés théoriques : elle remet en question la notion même de *concept* puisqu'il ne semble pas y avoir chez l'apprenant de structure d'ensemble organisée, du moins pas avant d'avoir atteint un haut niveau d'expertise. On ne comprend dès lors pas bien pourquoi les conceptions naïves ou antérieures à l'enseignement sont si "résistantes" au changement. En effet, le processus d'apprentissage lui-même est présenté comme s'il suivait directement la perception dans une référence explicite à la philosophie analytique, de telle manière que des phénomènes de *résistance* [28] à l'instruction, pourtant souvent observés dans les pratiques scolaires, apparaissent inexplicables par ce modèle.

26. Si la continuité n'était pas postulée comme l'état naturel du développement cognitif de l'individu, son changement de conceptions (ou d'idées) n'appellerait aucune explication de la part des chercheurs.

27. Ces postulats conduisent même à une opérationnalisation où les rôles sont partagés de manière tranchée : le *constructivisme* permet de postuler la conservation et la cohérence de la construction intellectuelle individuelle, que seules les *interactions avec le milieu* - en particulier ici les interactions avec le monde physique observé en classe de sciences, mais aussi avec les autres élèves et l'enseignant - permettent de déstabiliser, nécessitant une *accommodation* dont la forme plus particulière de *changement conceptuel* est le point de focalisation des recherches.

28. J'utilise ce terme dans le sens où Piaget l'utilisait pour la *résistance* des objets à l'intelligence, mais dans une direction d'ajustement inverse, c'est-à-dire dans le sens d'une assimilation déformante de l'instruction scolaire. Parmi les phénomènes de ce genre, on peut penser au déni expérimental, sur lequel je reviendrai à l'occasion d'une analyse de situation de malentendu.

Si cette théorie permet de bien expliquer les incohérences souvent observées dans les réponses des apprenants, elle le fait en attribuant directement ces incohérences aux *conceptions* des apprenants - ou au moins aux éléments qui permettent à de telles conceptions de se former progressivement - sans adresser le problème de la communication et de l'interprétation des productions des élèves ou même de leurs conduites en situations expérimentales. Or, les interprétations des participants à une recherche, des élèves ou même des chercheurs peuvent contribuer à rendre les conceptions présumées des apprenants incohérentes. Plutôt que de remettre en question le postulat de conceptions individuelles et problématiser l'interprétation des situations d'évaluation des connaissances/savoirs des élèves [29] la démarche, le débat se focalise sur la nature cohérente *versus* fragmentaire des conceptions des élèves.

Cette orientation infructueuse du débat trouve, à mon avis, une raison d'être dans le coût théorique important d'un abandon des conceptions individuelles dans l'architecture théorique majoritaire en psychologie cognitive, qui repose sur le paradigme de la *computation* : le fonctionnement cognitif est modélisé comme un système fermé dont les chercheurs peuvent procéder au découpage sans aucune restriction liée à la nature des phénomènes étudiés, et analyser séparément chaque partie pour ensuite, dans une computation effectuée par les chercheurs ou leurs machines, recomposer l'ensemble. Ce paradigme s'est construit autour de la métaphore du *traitement de l'information*, s'inspirant du fonctionnement des ordinateurs pour modéliser *par analogie* le fonctionnement cognitif humain [30], où la connaissance acquise par les individus est justement théorisée de manière fragmentée, à l'aide du concept d'*information*. Cette métaphore de l'information a rencontré un vif succès dans les publications en anglais, car elle s'adapte particulièrement bien à la philosophie de la connaissance de l'empirisme logique : issue de ce champ culturel anglo-saxon il y a quelques siècles seulement, cette théorie continue d'alimenter ce que Piaget (1957) nomme le "mythe de l'origine sensorielle de la connaissance".

Dans la métaphore du traitement de l'information, l'acquisition des connaissances/savoirs par un individu y est théorisée comme un échange d'informations entre la réalité et le cerveau qui traite ces informations selon un ensemble computationnel et modulaire [31], que les chercheurs peuvent modéliser séparément, démonter et remonter à loisir, conformément au postulat analytique. Autrement dit, sont exclues de cette philosophie de la connaissance et la thèse gestaltiste "le tout est plus que la somme de ses parties", et la dimension temporelle qui permettrait de raconter *l'histoire* d'une construction. En effet, les systèmes fermés propres au paradigme de la computation sont a-temporels : ils ne peuvent considérer qu'une même

29. On trouve une discussion explicite de ce refus d'une approche *située* dans un texte de diSessa (1993a).

30. Pourtant, l'intérêt de Turing (1950) pour les recherches en psychologie, notamment celles de Piaget, va dans la même direction mais en sens inverse : il s'agissait alors de fabriquer une machine reprenant quelques unes des caractéristiques faisant de l'intelligence humaine un organe si efficace.

31. Voir à ce sujet le passionnant débat entre les positions de Piaget et de Fodor, encore discuté aujourd'hui (voir p.ex. : Campbell, 2019). Lautrey (2007) montre que les reproches faits à Piaget ne prenaient justement pas en compte des limites des systèmes fermés, et leur inadéquation pour modéliser un organe aussi "ouvert" que le système cognitif humain. Cette ouverture s'entend non seulement à l'environnement physique, bien entendu, mais aussi - et surtout - au social, au culturel, à la dimension historique et, *last but not least*, aux possibilités créatives de l'être humain, capable notamment d'inventer de nouveaux signes pour penser ce qui demeurait jusque là impensé... Clément (1997) montre que le problème provient notamment de l'assignation à la psychologie par les philosophes d'un rôle trop réducteur, consistant à trouver des "mécanismes" du fonctionnement cognitif sans, justement, oser remettre en question le cadre mécaniste imposé par la philosophie, en particulier la philosophie analytique, et sa vision simpliste des rapports causaux.

information n'est pas forcément identique selon le moment considéré, par exemple. Pour plus de détails sur les limites des systèmes fermés, voir notamment Grize (1982).

À partir de ces quelques considérations, il n'apparaît pas étonnant que la théorie de l'acquisition des concepts par *fragments* ("p-prims") élaborée par diSessa (1993b) s'inscrit dans ce postulat analytique de composition de "pièces" tout d'abord peu organisées, et constituant progressivement un système [32] de connaissances/savoirs. Cette théorie s'inscrit par son vocabulaire et son usage mécaniste des systèmes dans le paradigme de la computation et souscrit à la métaphore du traitement de l'information, et hérite ainsi de postulats forts différents de ceux de l'épistémologie génétique (constructivisme et interactionnisme), ce qui a plusieurs conséquences :

— le postulat que la connaissance/savoir est constituée d'*information* ne permet pas l'étude de la connaissance/savoir en tant que processus *constructif* et *interactif* : l'information est transmise telle quelle de la réalité au cerveau individuel - tout au plus est-elle *traitée* à travers un processus complexe certes, mais sans surprise - et ne fait donc pas l'objet d'une *construction* (au sens piagétien) qui permettrait des divergences entre un ensemble de stimuli et les états mentaux subséquents chez des individus différents ou, mieux encore, dans des contextes différents ou à des moments différents pour le même individu ;

— en corollaire au postulat de l'information, les tenants de cette théorisation s'attachent à expliquer et inventorier des *biais*, qui constituent justement les éléments inattendus selon leur modélisation de la connaissance/savoir et de l'apprentissage : comme le traitement de l'information par les individus est modélisé par un système computationnel, les divergences entre individus et selon les contextes ne devraient pas apparaître - ces auteurs sont alors conduits à chercher une origine à ces biais qui ne se trouve justement pas dans le processus de transmission de l'information (ou processus d'interaction entre l'organisme et son milieu), puisque cela remettrait en question le postulat de l'information, et ils attribuent pour la plupart [33] ces biais à des structures innées ou autres causes inhérentes au fonctionnement du cerveau humain ;

— en corollaire au postulat de l'information toujours, l'interprétation - quand ce terme est utilisé [34] - n'est pas conçue comme un processus créatif effectué par un agent : il en résulte une différence fondamentale entre les usages du terme "construction" dans les théories du traitement de l'information et dans le postulat constructiviste de Piaget, une différence analogique à la différence entre la construction industrielle d'un objet effectuée par une machine automatisée (une construction par traitement de l'information) et la construction d'un objet par un enfant s'engageant spontanément dans un jeu de construction (une construction par interaction avec le milieu) : le premier n'est pas

32. Il faut entendre, ici, un système fermé du genre de ceux qui s'inscrivent dans le paradigme de la computation.
33. Par exemple, Baillargeon (2008) ; Goswami (2002) ; McCloskey, Washburn, et Felch (1983).
34. diSessa (1993a) explicite au moins partiellement dans quel sens il utilise le terme "interprétation", et s'il prend distance avec les premières théories du traitement de l'information, il ne remet pas pour autant en question les postulats fondamentaux discutés plus haut et diverge distinctement de son commentateur précisément sur la question du rôle que le processus interactif - ou interprétation - joue dans l'acquisition des connaissances/savoirs, objectivant, en quelque sorte, les p-prims imaginés par sa théorie.

> un processus créatif mais uniquement un processus de production, alors que le second ne produit peut-être rien, mais constitue indubitablement un processus créatif [35].

Paradoxalement, J. P. Smith et al. (1993) revendiquent une vision plus *continue* du développement des concepts chez les apprenants, et nomment cette nouvelle interprétation ou théorisation "constructiviste" (p. 115). Il me paraît cependant clair, après ce bref examen, que le terme "constructiviste" n'a pas le même sens pour ces auteurs que pour une autre filiation des travaux piagétiens, où les chercheurs se donnent justement pour objectif d'étudier des génèses ou microgénèses [36] (voir p.ex. : Garduño, 1998 ; Inhelder et al., 1992 ; Leutenegger, 2000) : du moment qu'ils s'inscrivent dans le paradigme analytique du traitement de l'information, l'investigation de *la construction des connaissances/savoirs* par les acteurs n'est plus possible, cette théorie reposant justement sur le postulat que *la connaissance/savoir est de l'information*, comme l'a souligné il y a déjà longtemps (Weil-Barais, 1993) dans sa revue des sciences cognitives.

Le symptôme le plus facilement observable d'un embrioglio théorique de cette dimension s'observe - et ce n'est sans doute pas un hasard - dans les contre-sens apparaissant au fil de *l'histoire* des idées proposées : ainsi, quelques décennies après les premières listes de biais ou "misconceptions" des débutants en physique, des auteurs proposent d'introduire une "nouvelle croyance naïve en physique" (Oberle, McBeath, Madigan, & Sugar, 2005, p. 643), qui consisterait à "ignorer la résistance de l'air et croire faussement que les objets tombent à la même vitesse". Cette "croyance naïve en physique" n'est pas seulement l'exact contraire de celle que proposait McCloskey (1983) trente ans plus tôt, c'est aussi ce qui est enseigné dans de nombreuses écoles depuis lors...

Autrement dit, je pense que ce que ces auteurs revendiquent - une vision plus continue de l'acquisition des concepts - ne peut être obtenue à travers un débat opposant tenants de la cohérence - ou théorie du changement conceptuel - et tenants de la fragmentation, car ce débat ne fait que révéler - quoique

35. Cette distinction s'inspire de celle entre activités *productives* et *constructives* est présentée et discutée par Samurçay et Pastré (2004) dans un cadre théorique néo-piagétien pour penser la didactique professionnelle : les premières sont (surtout) orientée vers la production d'objet (ou de services), les secondes vers la construction de connaissances/savoirs pour l'individu qui y prend part. Cette distinction est notamment importante en ce qu'elle permet de différencier le point de vue extérieur à la personne considérée du point de vue de cette personne. C'est une des raisons qui conduit également d'autres champs théoriques, comme la psychologie culturelle, à considérer l'interprétation comme une *création de sens* ("meaning making", voir par exemple Bruner, 1996) et/ou un processus de médiation (voir p.ex. : Cole, 1995 ; Cole & Valsiner, 2005 ; Vygotski, 1934/1997) qui met *en interaction* bien davantage qu'un *individu* et des *informations*. Les interactions triangulaire (voir p.ex. : Moscovici, 1984/1998 ; Perret-Clermont & Carugati, 2004) - c'est-à-dire à trois pôles - à l'origine de cet élargissement de la focale des chercheurs ont conduits à des modèles encore plus complexes à quatre pôles (par exemple un modèle de médiation sémiotique Zittoun & Perret-Clermont, 2009) ou à encore plus de pôles (par exemple la théorie de l'apprentissage par extension : Engeström, 1987), avec une grande diversité des représentations Zittoun, Gillespie, Cornish, et Psaltis (2007). La complexité des ces interactions ternaires, quaternaires (ou plus) va bien au-delà des "interactions" considérées dans le paradigme de la computation, qui ne sont toujours que binaires *in fine*, en ce qu'elles reposent sur le couple binaire *une cause - un effet*, même lors d'analyse statistiques complexes comme les analyses multi-factorielles, car leur modélisation de la complexité n'est que composition et recomposition de ces couples binaires. En adoptant le point de vue interne (c'est-à-dire *psychologique*...), il devient indispensable d'intégrer la dimension du *choix* dans ce processus. Au sujet de l'importance et des conséquences de l'intégration du *choix* dans la théorie en psychologie, je recommande au lecteur la récente argumentation que Mammen (2018) construit en faveur d'un *axiome du choix* en psychologie, fondée sur des réflexions épistémologiques et leur formulation en mathématiques. Le paradigme de la computation se limite cependant au point de vue externe, comme l'ont souligné de nombreux auteurs (en particulier Bruner, 1991a), en plus de réduire ce point de vue externe à une forme de *mécanisme* peu adéquat pour un modèle scientifique du *vivant*. Pour plus de commentaire sur la différence entre paradigmes mécaniste *versus* organique, voir p.ex. Baldwin (1895) ; Broughton et Freeman (1982) ; Jalley (2006) ; Kohler (2010b).

36. D'autres travaux font plutôt remonter à Vygotski ou Bartlett l'étude de processus de construction ou genèse (voir p.ex. : Rosenbaum & Valsiner, 2011 ; Van der Veer & Valsiner, 1988 ; Wagoner, 2009).

confusément - les divergences entre des héritages théoriques, voire philosophiques, de ces théorisations. Ce n'est pas non plus le recours aux "faits" ou aux données de recherche - interprétées justement en fonction de ces héritages théoriques - qui permet de résoudre les difficultés de théorisation constatées. Ma (trop) brève analyse ci-dessus m'invite à examiner plutôt la construction théorique elle-même des chercheurs relativement aux *conceptions* attribuées aux élèves ou novices en sciences, jusqu'à se permettre une remise en question de la pertinence du concept de *conceptions*.

Dans ce but, la section suivante met brièvement en évidence la diversité des points de vue des chercheurs quant à cette idée de *conceptions* attribuées aux élèves. Je pense ici en particulier aux reliquats de la philosophie de la connaissance de l'empirisme logique, mais évidemment aussi à l'épistémologie génétique de l'équipe piagétienne, en tant que philosophie de la connaissance. Dans le second cas, cependant, il s'agit d'une épistémologie explicite et travaillée empiriquement, alors que dans le premier il s'agit souvent d'assomptions auxquelles les chercheurs souscrivent implicitement pour avoir construit leur théorie dans un bain culturel particulier. Piaget est bien entendu lui aussi orienté par un bain culturel particulier, mais celui-ci fait également l'objet d'analyse et de reconstitution historique explicites (voir p.ex. : Barrelet & Perret-Clermont, 1996). L'influence de la philosophie de l'empirisme logique est beaucoup plus diffuse et difficile à mettre en évidence explicitement.

2.1.5 Quelques remises en question des *conceptions*

Le débat évoqué ci-dessus fournit un aperçu de la littérature sur les *conceptions*, mettant en scène des théories issues de la psychologie cognitive, où l'attribution aux individus des *représentations*, *images mentales* ou *conceptions* n'est pas discutée : elle fait partie des assomptions communes du domaine de recherche. Il ne faut cependant pas surestimer l'adhésion des chercheurs impliqués dans l'étude de l'apprentissage des sciences à cette idée : plusieurs auteurs prennent distance, même s'ils le font parfois très discrètement, avec le paradigme individualiste et mentaliste du courant cognitiviste.

Ces prises de distance avec les assomptions de la psychologie cognitive apparaissent dès les premiers travaux en didactique des sciences, même en anglais (voir p.ex. : Driver et al., 1985). Driver, Leach, Millar, et Scott (1996) montrent que l'épistémologie des sciences naturelles à laquelle les élèves et étudiants souscrivent - plus ou moins consciemment - joue un rôle important dans les difficultés identifiées par ailleurs dans les recherches sur les *conceptions*. Pour Viennot (1998, 2007), c'est le *mode de raisonnement* des élèves qui permet d'expliquer les réponses documentées comme des conceptions par d'autres auteurs. Elle considère le recours à des *représentations* individuelles inutile. Son argument est remarquable [37] car il se réfère précisément à un principe de rigueur dans la théorisation : le principe d'économie. En conséquence, Viennot s'intéresse au sens commun des élèves au sens large, incluant le raisonnement des élèves sur des objets scientifiques particuliers, par exemple leur tendance à "matérialiser les objets de la physique" (Viennot, 1996, p. 25) en optique, ou encore la manière dont ils utilisent l'expérimentation scientifique pour construire des connaissances/savoirs, ou justement sans construire de connaissances/savoirs mais unique-

37. C'est le seul exemple que j'ai trouvé dans la littérature examinée d'une référence explicite à un principe de théorisation du phénomène psychologique étudié.

ment pour effectuer le travail exigé par l'enseignant sans raisonner. Il ressort de ces travaux une impression plus complexe et plus dynamique des difficultés des élèves que lors de la présentation de *conceptions* sous la forme de réponses stéréotypées : c'est bien plutôt le fait pour les élèves de s'engager dans un raisonnement ou pas, et le détail et la qualité de ces raisonnements qui font la différence entre un processus d'apprentissage réussi et la confrontation à des obstacles, difficultés ou errements. Nous reviendrons à la question de la qualité du raisonnement avec les travaux sur l'argumentation dans l'apprentissage des sciences.

À ces quelques exemples s'ajoutent des recherches, plus nombreuses, qui mettent occasionnellement en évidence l'importance du langage dans l'apprentissage des sciences, montrant que le discours amène par lui-même des occasions pour les élèves de se tromper : en physique, le terme "force" a par exemple été identifié par de nombreux auteurs (voir p.ex. : Driver et al., 1985 ; Ioannides & Vosniadou, 2002 ; Viennot, 1989d ; Weil-Barais & Lemeignan, 1990) pour être à l'origine de confusions entre son sens technique et son sens commun, que ce soit en français ou en anglais. En outre, dans l'enseignement le langage fonctionne au moins à deux niveaux : il s'agit de transmettre une demande à l'élève à travers la consigne, dans un processus de *dévolution* (Brousseau, 1998/2004) de la tâche aux élèves, et souvent simultanément il s'agit de communiquer les savoirs au sujet du monde physique, par une mise en mots des savoirs à enseigner [38]. Ces processus sont l'occasion d'incidents particuliers, dont je tenterai de montrer quelques exemples dans cette recherche. Par exemple, au niveau de la consigne, les "erreurs de compréhension de la consigne" (Astolfi, 1997) sont bien connus dans la pratique scolaire. Au niveau de la *transposition des savoirs*, un incident presque aussi célèbre chez les praticiens est la confusion entre le mot et le référent, à laquelle se confronte toute pratique évaluative reposant sur le langage : si un élève utilise le terme "inertie", a-t-il pour autant acquis le concept *inertie* ?

Ces remarques sur un terme linguistique sont néanmoins souvent traitées dans la littérature comme des problèmes anecdotiques, liés à des mots ou expressions particulières, sans conduire les chercheurs à une remise en question radicale de la théorie de l'apprentissage utilisée. Exception notoire, Halbwachs (1975, 1978) propose une didactique de la physique qui repose sur le rapport entre le discours d'un modèle scientifique de la nature et les connaissances/savoirs que les élèves sont invités à construire, en s'inspirant du principe de Protagoras, qu'il cite : "l'homme est la mesure de toute chose" (Halbwachs, 1975, p. 22). Dix ans plus tard, Halbwachs et Torunczyk (1985) mettent en évidence les spécificités du langage utilisé pour les savoirs de physique, dans une analyse qualitative systématique qui montre que les discours constitutifs des modèles de physique enseignés sont non seulement l'héritage de plusieurs siècles d'histoire, mais aussi qu'ils sont déterminants pour les apprentissages effectués par les élèves et pour les écueils et obstacles qu'ils rencontrent. Les élèves se trouvent confrontés à une double tâche : l'acquisition de *connaissances/savoirs* en physique, et l'acquisition d'un *langage spécialisé*, qui en est l'outil ou le média. Cette recherche suggère qu'en modifiant le discours, ne serait-ce que quelques détails du média sémiotique utilisé pour communiquer

38. Or, cette mise en mots est l'occasion de processus complexes de *décontextualisation* et *recontextualisation* des savoirs (Perret-Clermont, Brun, et al., 1982), théorisé par la suite à l'aide du concept de *transposition didactique* (Chevallard, 1985), dont il existe aujourd'hui des développements théoriques autour des *savoirs de référence* ou, plus tard, des *pratiques de référence* (Legardez, 2004 ; Martinand, 1983, 1986 ; Reuter, Cohen-Azria, Daunay, Delcambre, & Lahanier-Reuter, 2013 ; Verret, 1974).

un modèle de physique, les difficultés rencontrées par les élèves au cours de leur apprentissage s'en verraient transformées.

Tiberghien et Malkoun (2007) explorent cette hypothèse dans une vaste recherche mettant en oeuvre une double ingénierie didactique, permettant la comparaison entre une séquence traditionnelle à l'établissement scolaire partenaire, et une séquence faisant usage de discours différents pour communiquer des savoirs de physique considérés identiques par les spécialistes. Les chercheurs montrent que les *facettes* des savoirs enseignés que les élèves s'approprient sont justement liées aux spécificités de l'enseignement dispensé, et en particulier à la mise en discours particulière effectuée pour chacune des séquences [39]. Ce résultat va dans le sens d'une explication des difficultés des élèves dans l'apprentissage de la physique reposant sur un effet de la scolarisation elle-même, et plus précisément des spécificités de la mise en discours des savoirs lors de l'enseignement. Cette explication peut être considérée complémentaire ou contradictoire [40] de celle qui trouve l'origine des difficultés des élèves dans les conceptions individuelles du monde physique qu'ils ont construites avant leur pratique scolaire.

À ces travaux francophones de didactique des sciences s'ajoutent d'autres critiques ou prises de distance avec l'assomption de psychologie cognitive de conceptions individuelles. Weil-Barais (1993) a depuis longtemps montré que les processus de communication ont été sous-estimés voire ignorés en psychologie cognitive, et en particulier dans le modèle du traitement de l'information. Selon l'auteure, ce modèle postule le concept d'information sans le problématiser, ce qui empêche toute investigation des processus d'interprétation qui conduit les personnes à attribuer un sens différent à une *information*, selon le contexte, le moment ou son histoire. Pour Weil-Barais, 1993, pp. 431-437, le défi futur de la recherche sur l'apprentissage consiste à passer de *l'information* à *l'interprétation*.

Cette attention requise aux processus d'interprétation converge avec la remise en question *interactionniste* (voir p.ex. : Doise, Mugny, & Perret-Clermont, 1975 ; Greeno & van de Sande, 2007 ; Inhelder, Sinclair, & Bovet, 1974 ; Mead, 1934 ; Perret-Clermont, 1979/2000 ; Rommetveit, 1978 ; Wertsch, 1989), déjà ancienne, mais dont les conséquences pour la pratique de la recherche restent encore largement inexploitées : justement par manque d'explicitation des fondements théoriques et épistémologiques de leurs démarches, les chercheurs font souvent usage de méthodologies inadéquates avec les conclusions de la critique du réductionnisme positiviste qui fait le déni du social, du culturel, et du sémiotique, et continuent d'utiliser des concepts (p.ex. *information*) et de mettre en œuvre des méthodologies de recherche comme si tout se passait dans des cerveaux séparés et isolés, qui se rencontrent comme des particules de physique dans le vide intersidéral, abordant les sujets de recherche comme des personnes dépouillées de leur histoire et de leur instrumentation culturelle.

Piaget est parfois présenté comme un auteur *positiviste* (voir p.ex. : Burman, 2008), pour avoir traité du *sujet épistémique* : or, ce concept permet justement de mentionner explicitement le regard universaliste

39. Le temps passé sur certaines facettes joue également un rôle important dans les résultats.

40. Selon la manière dont ces explications permettent de rendre compte du phénomène, l'explication des difficultés des élèves par le processus même de communication peut remplacer celle qui attribue aux conceptions des élèves ces mêmes difficultés, ou partager avec elle un part de l'effet selon les cas et dans des proportions variables.

que Piaget adoptait dans certains de ses travaux, au moment de faire de l'épistémologie et non de la psychologie. L'erreur provient de l'extension de sa théorie épistémologie sur l'origine de la connaissance humaine, qui ne permet pas d'expliquer des situations singulières, à un usage psychologique pour lequel elle n'était justement pas prévue. Pourtant, cette psychologie fondée sur l'épistémologie génétique, s'intéressant au sujet psychologique, existe - elle a été fondée explicitement par Inhelder (Inhelder, 1962 ; Inhelder et al., 1992, 1974) - et elle se donne justement pour méthodologie et pour objectif une science des processus singuliers et situés, prenant non seulement en compte la critique de l'interactionnisme symbolique mais également celle de Piaget contre la vision étriquée de la science des sciences cognitives, héritée de la philosophie sensualiste et de l'empirisme logique.

Une critique explicite des pratiques d'analyse des *conceptions* dans la littérature est proposée par Roth (2008a), qui remet en question la littérature du *conceptual change* à l'aune de la psychologie discursive. Son approche révèle certains présupposés de l'approche "constructiviste" [41] au sujet justement du caractère *individuel* ou *collectif* des processus étudiés, et de la nature située du discours sur lequel les chercheurs se basent pour attribuer des conceptions. Ses critiques convergent [42] avec celles que j'ai présentées [43] ci-dessus :

> *Presupposed in the recommendations for conceptual change and in theorizing any change observed is, once again, the attribution of (mis-, pre-, etc.) conceptions not merely to the individual person but to his or her mental structure. This research discussed so far falls into a cognitive approach to conceptual change ; another approach with a different ontology and epistemology exists in a sociocultural approach (Mason, 2007). (...)*
>
> *These definitions are consistent with a recent statement of leading conceptual change theorists and researchers, who describe "conceptions as learners' mental models" (Treagust & Duit, in press). (...)*
>
> *There is an (implicit) assumption that the (interview, task) situation itself does not mediate the conceptual organization but that the situation simply allows reading out an at least temporarily stable mental organization (Ueno, 1993). Strong arguments have been made on sociocultural grounds contesting the "reading off" of conceptions from interview texts (Halldén, Haglund & Strömdahl, 2007). (...)*
>
> *I show below that interview participants talk about scientific phenomena even when they have never talked or thought about them before, in which case, what they say cannot be driven by or be the result of a conception.*
>
> *(Roth, 2008a, p. 31 et p. 33)*

Roth relève l'assomption (implicite) des chercheurs attribuant des conceptions à partir d'entretiens ou de tests à la possibilité d'une "lecture" neutre des états mentaux ou des connaissances/savoirs des participants aux recherches, alors que de nombreux travaux de recherche - notamment dans l'approche socio-culturelle - ont montré qu'il ne s'agit pas simplement d'une *lecture*, mais d'une *médiation* bien plus

41. Ce terme fait plutôt référence au sens utilisé dans la psychologie cognitive du paradigme computationnel, à mon avis, que dans le sens du postulat épistémologique de Piaget.
42. Cette recherche était en cours lors de la publication de Roth (2008a).
43. La présente recherche était en cours au moment de la publication de l'article de Roth.

complexe ou, dans les termes de Weil-Barais (1993) utilisés plus haut, au moins d'une *interprétation*. Un argument très simple peut être donné pour illustrer le problème : à travers un entretien ou un test tels qu'ils sont utilisés dans ces recherches, un enfant peut être amené à se prononcer sur un problème ou une question qu'il ne s'est jamais lui-même posé ; et pourtant, l'assomption d'une *lecture* considérera la réponse de l'enfant comme mesure ou indicateur de sa *connaissance/savoir* du problème ou sur la question préalable au questionnement (la *conception*). Nous préférerions considérer qu'il n'a aucune connaissance/savoir, et que sa réponse se construit au moment de l'entretien ou du test [44].

C'est ce que souligne Roth (2008a) en jetant un regard issu de la perspective de la psychologie discursive sur cette littérature attribuant des conceptions aux individus :

> *... the discursive psychology perspective theorizes the content and function of talk and language itself. (...)*
>
> *Taking another look at the brief exchange between interviewer and child, se see that the interviewer is doing more than just posing a question. He is formulating what he is going to do rather that just doing it. (...)*
>
> *Because the two collude and thereby achieve the interview collaboratively, one has to question whether it is legitimate to extract the child's productions and attribute it to her mind ; an alternative would be to do choose a unit of analysis that includes interviewer and child, therefore making the (mis-, etc.) conception a collaborative production made possible by particularities of the language that they share.*
>
> *(Roth, 2008a, p. 32)*

Pour l'auteur, l'attribution par les chercheurs de conceptions à un élève à partir d'un entretien (ou test écrit) n'est pas légitime car la question posée à l'élève fait bien davantage que révéler des conceptions : elle oriente l'attention sur ce qu'il faut faire pour satisfaire la demande, voire définit déjà un problème en contraignant les réponses possibles - socialement acceptables - à un ensemble très réduits d'options [45]. Roth propose deux solutions pour éviter ce problème :

- ne pas attribuer la réponse produite par l'élève à ses connaissances/savoirs individuelles ;
- choisir une unité d'analyse qui inclut chercheur (ou interviewer) et enfant (ou interviewé), et considérer le discours produit (la question et la réponse) comme une production conjointe relative aux connaissances/savoirs des interlocuteurs et aux particularités du langage qu'ils partagent.

La première de ces deux solutions consiste assez simplement à l'abandon d'une psychologie *cognitive*. C'est néanmoins l'option retenue dans nombres de travaux actuels (voir section 3.2, page119 et suivantes) s'intéressant aux discours, à l'argumentation, à la médiation des apprentissages par la culture, à l'importance des interactions sociales ou à l'agencement d'un milieu didactique, ou à d'autres aspects encore

44. Voir aussi à ce sujet le travail de Bourdieu (1972/1984) sur les sondages d'opinion, qui montre que les postulats de la démarche sont faux : tout le monde n'a pas une opinion, les opinions existantes ne se valent pas et ne peuvent simplement s'additionner pour former une majorité, et le consensus n'est pas toujours possible.

45. Nous verrons justement dans cette recherche comment une minorité d'élèves sortent systématiquement de ce cadrage, produisant des réponses que enseignants et chercheurs peinent à interpréter.

auxquels la psychologie cognitive ne s'est que marginalement intéressée, et qui apparaissent néanmoins indispensables à une théorie des processus d'apprentissage. Vu le but de cette recherche, la seconde solution nous intéresse davantage. Elle nécessite néanmoins un travail sur la question des *unités d'analyse*[46], et la mise en chantier des postulats épistémologiques relevés lors de l'examen de la littérature pour proposer une théorisation explicite qui me semble manquer à la poursuite des travaux sur les conceptions apparaissant aux chercheurs dans l'étude de l'apprentissage des sciences. C'est pourquoi je présente à la prochaine section une "intermède épistémologique", permettant d'aborder ces questions. Avant de se lancer dans ce travail, faisons une synthèse de l'examen rapide de la littérature que j'ai proposé dans cette section pour montrer que la recherche sur l'apprentissage des sciences a un besoin de théorisation bien spécifique.

2.1.6 Synthèse : un problème de théorisation

À la suite de ce rapide examen de la littérature, ma synthèse du problème de l'apprentissage des sciences consiste à proposer l'interprétation suivante : poursuivre les recherches dans ce domaine nécessite une théorisation plus explicite du phénomène des *conceptions* antérieures à l'instruction scolaire en sciences, notamment parce que la confrontation de travaux issus de cadre théoriques ou philosophiques différents - et parfois implicites - n'a pas permis de construire une explication consensuelle du phénomène constaté. Autrement dit, je considère que les auteurs s'accordent plutôt bien sur les observations - largement documentées empiriquement par les chercheurs dans la seconde moitié du $XX^{ème}$ siècle - mais qu'ils divergent quant à l'interprétation de ces observations, faute d'un débat spécifiquement orienté sur les postulats théoriques sous-jacents aux interprétations divergentes ou aux démarches méthodologiques utilisées[47]. C'est, à mon avis, ce qui empêche la confrontation des points de vue des chercheurs d'aboutir à une coordination de leurs perspectives[48] réciproques.

46. La critique de Roth (2008a) repose sur la revendication d'une unité d'analyse à un niveau plus collectif que l'individu, en particulier son système cognitif. Cependant, les psychologues discursifs s'interdisent complètement de faire des hypothèses sur les conceptions des participants.

Je ne pense pas que cela soit toujours inadéquat, mais plutôt qu'il s'agit de clarifier à quel échelon l'observation scientifique est menée *pour chaque cas particulier*. Cette précaution prise, il peut être pertinent de faire des attributions à différents échelons (individuel, interactionnel, etc.) au cours des analyses, à condition de disposer de la méthodologie d'analyse adéquate, par exemple en s'aidant de tous les éléments hors du discours qui participent à la situation étudiée, de manière à fournir de quoi construire des hypothèses concernant les états cognitifs (ou autres) des personnes observées. Mais un développement théorique semble nécessaire pour y parvenir.

47. L'importance de la théorisation semble avoir échappé à de nombreux débat du courant cognitiviste, comme s'il n'y avait qu'une seule manière de théoriser un phénomène ou, autrement dit, une seule manière de définir les concepts sur lesquels portent le débat. Les travaux tentant de prouver que la permanence de l'objet apparaît plus précocement que ne le pensait Piaget à l'aide de mesure de temps de réaction en fournit un exemple patent : les arguments des expérimentalistes (Baillargeon, Spelke et Carey, cité par Lautrey et al., 2008, pp. 30-31) en faveur de conceptions naïves innées discutent quasi-exclusivement sur la méthode et son adéquation aux hypothèses, et ne reprend pas la question de la définition de la *permanence de l'objet*, par exemple. Or, lorsque l'enfant est conduit à une habituation à un phénomène perceptif régulier, dans ces nouvelles recherches, il ne s'agit plus de la même *permanence de l'objet* que celle que tentait d'observer Piaget à travers des inférences sur l'apparition et la disparition d'objet du champ visuel dans le discours de l'enfant. Le long débat sur les expériences de Michotte concernant la causalité est également un exemple intéressant de débat insoluble du fait d'un manque d'attention à la théorisation et aux fondements philosophiques des démarches de recherche utilisées.

48. Je distingue *point de vue*, utilisé pour situer le "regard" porté par rapport à un agent particulier et singulier, de *perspective*, utilisé pour situer le "regard" construit à l'aide d'une théorisation, que plusieurs agents peuvent s'approprier de manière suffisamment semblable pour partager un "regard" commun sur un ensemble de phénomène ; je décris brièvement à la section 8 (p. 709), p.ex. exemple, la *perspective* newtonienne en physique.

Dès lors, je propose dans la section suivante un détour qui revient sur la théorisation, en que processus de construction d'une théorie (pour une définition, voir : Grize, 1982), et sur quelques réflexions épistémologiques qui permettent de construire quelques critères pour le travail de théorisation.

2.2 Intermède épistémologique

> *En pratique, il y a tant d'ordres de grandeur qui séparent les molécules des fluides ou des cerveaux, que les modèles et les méthodes utilisés pour étudier les uns et les autres peuvent être très différents, si bien qu'établir un lien direct entre les deux n'est pas forcément une priorité. Autrement dit, le type d'approche dans chaque domaine de recherche devrait dépendre des phénomènes spécifiques qu'on cherche à y étudier.*
>
> *(Sokal & Bricmont, 1997, p. 190)*

2.2.1 Introduire une échelle en psychologie

2.2.1.1 Il y a un problème d'échelle

Le besoin de théorisation que j'ai argumenté à la section précédente porte, notamment, sur la question de la nature des connaissances humaines. À la suite de la remise en question de la nature strictement individuelle des connaissances/savoirs par l'interactionnisme symbolique (Mead, 1934), l'ethnométhodologie (Garfinkel, 1967), et l'approche socio-cognitive déjà citée (voir aussi page 40), des courants de recherche plus récents ont proposé de nouvelles théorisations de ce vieux débat, par exemple l'approche *écologique* de la cognition (Gibson, 1986), ou la *cognition distribuée* (*distributed cognition*, voir p.ex. : Hollan, Hutchins, & Kirsh, 2000)), ou encore l'idée d'un esprit *incarné* (*embodied mind*, voir p.ex. : Varela, Thompson, & Rosch, 1991), ou encore d'un *esprit étendu* aux objets et milieux qu'il côtoie (*extended mind*, voir p. ex. A. Clark, 2008 ; A. Clark & Chalmers, 1998 ; Kono, 2010). Ces travaux tentent, chacun à leur manière, de réinvestir dans la théorisation des connaissances humaines les dimensions expérientielle et subjective d'une part, mais aussi matérielle, sémiotique et technologique d'autre part. Un des objectifs consiste à inclure dans le concept de connaissance/savoir le milieu (matériel, social, culturel, technologique, etc.) avec lequel l'individu est en interaction et le sens que prend cette interaction, dépassant d'une manière ou d'une autre une compréhension strictement individuelle et physicaliste de la cognition et de la connaissance humaine.

Malgré le débat cité ci-dessus, la majorité des travaux de recherche en sciences cognitives considèrent néanmoins toujours, que ce soit par le vocabulaire conceptuel utilisé ou par les démarches méthodologiques choisies, que les connaissances/savoirs sont strictement individuelles. Les sciences cognitives n'ont jamais cessé de faire majoritairement usage d'une telle conception de la cognition, et la mode actuelle en faveur des neurosciences n'a fait que renforcer la réduction du cognitif au cerveau, autant chez les chercheurs que dans les représentations sociales, et cela malgré l'absence de théorisation au sujet des liens supposés entre cerveau et cognition. L'argument classique en faveur de cette position réductionniste consiste à évoquer le substrat physique de ces connaissances/savoirs - des traces dans les cerveaux d'individus humains - comme ultime "réalité" des connaissances humaines, en procédant *per absurdum* : si tous les cerveaux

humains venaient à être détruits, la connaissance humaine n'existerait plus, *donc* celle-ci se trouvent dans les cerveaux des individus et *donc* la connaissance humaine est individuelle. Néanmoins, ce réductionnisme des phénomènes psychiques à un substrat matériel procède lui-même de postulats qui ne sont pas partagés par tous les courants de recherche : en particulier le postulat analytique qui nie la possibilité pour un *tout* d'être *plus* ou *autre chose* que la somme de ses parties. Sans ce postulat, la seconde conclusion ci-dessus (le second "*donc*") est trop restrictif : la connaissance humaine pourrait ne pas être seulement individuelle, mais comprendre également quelques phénomènes *émergents* d'un ensemble social, culturel, d'une histoire des idées humaines, etc. qui sont constitutif des connaissances/savoirs. La connaissance humaine est alors davantage que la somme des cerveaux humains, quand bien même la destruction matérielle de ces cerveaux conduirait à son anéantissement [49].

Ce réductionnisme de la connaissance/savoir à la matérialité du cerveau, par ailleurs, est incompatible avec une des assomptions fondamentales des sciences de la nature, énoncée dans la citation des physiciens Sokal et Bricmont (1997) ci-dessus, que j'ai mise en exergue précisément dans ce but : il existe dans la réalité qu'observent les scientifiques des *niveaux* auxquels les phénomènes n'apparaissent pas de la même manière, et où ils n'obéissent pas aux mêmes lois. Or, l'identification et la caractérisation de ces *niveaux* en sciences de la nature a pris plusieurs siècles de recherches intensives : ils ne s'agit pas seulement de les choisir, comme une option méthodologique basée sur les préférences des chercheurs ou sur des arguments liés à la faisabilité de l'étude, comme c'est souvent le cas dans la littérature des sciences humaines. Il s'agit également de s'enquérir des résultats de ces choix sur les savoirs que les recherches orientées sur des niveaux spécifiques permettent ou non de construire au sujet d'un phénomène. Or, ce retour, cette rétro-action du réel dans l'activité scientifique, est rarement analysée et fait encore plus rarement l'objet d'un examen systématique. Une exception notable se trouve chez (Doise, 1982), qui se donne pour tâche de classer les principales publications de psychologie sociale de son époque selon quatre *niveaux* distincts, qui émergent eux-mêmes de son analyse. Malheureusement, ce travail exemplaire ne semble pas avoir fait l'objet d'une reprise systématique ni d'un référencement précis au sein de la discipline, et encore moins l'objet de débat dans les recherches subséquentes de psychologie sociale. En outre, la caractérisation en quatre *niveaux* n'est qu'un premier pas dans ce travail titanesque : la recherche d'une échelle pour les sciences humaines nécessite sans doute un découpage beaucoup plus fin, multipliant les *niveaux*, et dont la pertinence ne peut être discutée que relativement à des questions ou à des phénomènes bien définis.

En guise de clôture de cet argumentaire en faveur d'une échelle en psychologie, je cite Perret-Clermont (2004), qui termine un article où elle reprend justement les quatre niveaux de Doise pour classer et discuter systématiquement ses travaux des trente années précédentes :

> *"Et pour les trente années à venir ?*

49. Certains courants remettraient même en question cette conclusion, puisque les traces restantes de la connaissance humaine après la destruction de l'espèce - p.ex. un objet technologique - tiennent lieu de *connaissances* selon certaines théories ; c'est le cas par exemple du courant de l'*extended mind*. Par contre, pour la psychologie écologique de Gibson (1977) l'agent humain est seul sujet *connaissant*, contrairement à ce que laissent penser de nombreux usages un peu lâches de son concept d'*affordance*.

> *L'articulation entre les niveaux d'analyse s'avère être un travail de longue haleine. On sait combien elle peut s'avérer utile pour éclairer la complexité des situations éducatives (Monteil, 1989 ; Perret-Clermont, 2000 ; Carugati & Perret-Clermont, 1999). Plus encore, la fécondité de ce modèle permet une ambition supérieure : celle d'articuler, autour de mêmes sujets précis d'enquête, l'apport de la psychologie sociale à celui d'autres sciences humaines. En effet, Willem Doise ouvre ici une voie pour comprendre l'inscription socio-culturelle et historique des interactions et leurs enjeux au niveau des personnes, des groupes et de la société. Il faudra donc bientôt conter la suite de l'histoire...*
>
> *(Perret-Clermont, 2004, p. 98)*

2.2.1.2 Quelques éléments en vue d'une échelle en psychologie

Au vu de ce qui précède, il me parait utile de définir une *échelle d'observation* pour la psychologie, telle qu'on la trouve par exemple en géographie[50]. *Echelle* est définie dans un dictionnaire critique de géographie (Brunet, Ferras, & Théry, 1992/1993, p. 175) comme un "ensemble d'échelons permettant de changer progressivement de niveau". S'ensuit une longue liste d'échelles diverses et variées utilisées par les géographes et les géologues, dont la plus connue est sans conteste l'échelle des cartes. Celle qui nous intéresse est la cinquième définition :

> *5. On peut établir ainsi des échelles d'observation des phénomènes.*
>
> *(Brunet et al., 1992/1993, p. 175)*

Des autres définitions spécifiques, il est intéressant de relever le rapport d'une échelle à une mesure, et surtout le fait que "d'une façon plus générale, tout changement d'échelle modifie les perceptions et les représentations, et parfois même la nature des phénomènes" (Brunet et al., 1992/1993, p. 175).

Le terme "phénomènes" mérite quelques commentaires, car il n'est pas courant en psychologie, où les chercheurs font plus facilement référence à des "faits" ("évidence" en anglais), voire à des "causes" ou "facteurs" dont la terminologie empruntée aux statistiques, est souvent transposée sans aucun scrupule de la méthodologie à l'ontologie. Or, ces notions sont problématiques, et particulièrement importantes dans la théorisation : il n'existe pas de fait "pur"", explique Morin, 1982/1990, pp. 41-42, affirmant qu'il s'agit toujours pour les chercheurs d'une "opération de sélection des faits ; élimination de ceux qui ne sont pas pertinents, intéressants, quantifiables, jugés contingents". J'utilise le terme *phénomène* pour rendre compte de l'implication de l'observateur dans ses observations, c'est-à-dire en reconnaissant l'importance du *phénoménal*, de la manière dont ce que nous considérerons peut-être plus tard des *faits* dans le processus de construction de connaissance, nous apparaissent d'abord avec toute la contingence liée aux modes de cette apparition, que ceux-ci soient liés à notre système perceptif, à celui de nos instruments techniques, ou encore aux propriétés physico-chimiques du phénomène lui-même. Morin (1982/1990) distingue néanmoins

50. L'idée de se référer à la géographie, la science qui sans doute a eu le plus tôt besoin de différencier les échelons d'observation, m'a été donnée par Anne-Nelly Perret-Clermont lors d'une communication personnelle (voir aussi sur ce sujet, la recherche de Ligozat, 2008)

précautionneusement cette question épistémologique d'une science qui ne peut jamais prétendre avoir un accès directe à "la réalité", de la question de l'objectivité des savoirs produits par la science, que d'aucuns décideraient d'abandonner - comme on jette le bébé avec l'eau du bain - du moment qu'ils devraient renoncer à connaître "la réalité" une fois pour toutes. L'objectivité repose cependant justement sur la qualité du processus de construction des savoirs scientifiques, dont je discute ici l'introduction d'un élément supplémentaire : la prise en compte rigoureuse du problème d'échelle.

La citation de Brunet et al. (1992/1993) se poursuit avec une remarque qui justifie cet emprunt à la géographie :

> *"C'est en partie une question de relation entre sujet et objet (...), c'est surtout une question de discontinuité dans l'ordre de taille des phénomènes, lesquels n'ont plus la même signification, quelquefois plus le même sens ni la même structure. (...) Aussi, le changement constant d'échelle, s'il est maîtrisé, est extrêmement utile et la compréhension* transcalaire *et* multiscalaire *de l'espace est toujours supérieure à une vision monoscalaire.*
>
> *(Brunet et al., 1992/1993, p. 175).*

La recherche en psychologie dispose là d'un potentiel de développement théorique à exploiter : bien des éclaircissements pourraient être apportés aux résultats de recherche et aux théories qui y sont relatives, p.ex. pour la théorie de l'apprentissage et le débat du changement conceptuel, si ces résultats et théories étaient articulés dans une psychologie *transcalaire* ou *multiscalaire*[51]. Ce concept d'*échelle* attire également l'attention sur la notion d'*ordre de grandeur*, qui fait référence à des discontinuités dans une échelle. Ces ordres de grandeur ne sont pas définis arbitrairement par les chercheurs, mais doivent être définis de manière à représenter des changements dans la manière dont les phénomènes apparaissent à la recherche. Pour reprendre notre analogie avec la physique, l'exemple des ordres de grandeur subatomique (plus petit qu'un atome) et supra-atomique est parlant : la notion de matière n'a pas le même sens dans un ordre de grandeur que dans l'autre[52]. La mise en évidence d'*ordres de grandeur* constituerait également une (nouvelle) forme de connaissance scientifique émergeant d'un vaste travail d'articulation des recherches dans une psychologie transcalaire ou multiscalaire.

Pour introduire le concept d'*échelle* en psychologie, il s'agit donc d'en définir des ordres de grandeurs qui correspondent à des discontinuités dans les propriétés des phénomènes lorsqu'ils sont observés à différents niveaux. Une fois définis, nous nommerons de tels ordres de grandeurs des *échelons*[53], le concept de géographie qui désigne les niveaux d'observation. Quelle est l'échelle pertinente de la psychologie ?

51. De manière analogue à ce que la biologie est une science transcalaire et/ou multiscalaire, qui va de la biologie moléculaire à la biologie qui traite de l'environnement et des écosystèmes, tout en étant capable de se référer à une architecture théorique commune.

52. La notion de matière solide, par exemple, n'est plus du tout la même à l'échelon subatomique, pour autant qu'elle ait même encore un sens.

53. Il est courant de rencontrer un usage abusif du mot *échelle* alors que le terme correct est *échelon*, par exemple dans l'expression *changer d'échelle* (Brunet et al., 1992/1993, p. 176) qui signifie souvent *changer d'échelon*, à moins bien entendu qu'elle ne désigne effectivement l'usage d'une échelle fondée sur une manière différente d'aborder la "grandeur", comme pour les tremblements de terre, par exemple, qui peuvent être "mesuré" sur l'échelle de Richter ou sur l'échelle de Mercalli selon que l'on s'intéresse à la secousse elle-même ou aux dégâts provoqués par le séisme. Je considère ici qu'il est crucial de distinguer échelle et échelon pour pouvoir désigner les multiples échelons dans une échelle donnée, d'une part, et les éventuelles multiples

Existe-t-il déjà des ordres de grandeurs définis en sciences humaines ? Bien entendu, la psychologie peut être amenée à produire plusieurs échelles. Nous avons par ailleurs de bonnes raisons de penser qu'une échelle d'observation ne peut définir ses échelons qu'en relation à l'objet investigué [54] et par conséquent de multiples échelles semblent inévitables dans la psychologie en général, les unes étant pertinentes pour certains objets de recherche, et les autres pour d'autres. C'est évidemment le cas pour la géographie et les autres sciences également : on trouve les échelles des cartes pour représenter l'espace, les échelles temporelles pour l'histoire géologique de la terre, les échelles de géographie humaine, etc.

En psychologie, une échelle générique rudimentaire est parfois utilisée, qui distingue trois échelons : micro, meso et macro. Mais est-ce suffisant de définir trois niveaux avec les termes *micro-, meso-, macro-* pour constituer une échelle ? Y a-t-il une telle échelle en psychologie ? Ce n'est pas sans ironie que l'on trouve, dans le dictionnaire de géographie, la remarque suivante pour le domaine des sciences humaines :

> *Nombre d'autres échelles sont censées classer et permettre les comparaisons, sans toujours pouvoir être associées à des mesures précises. Telle est l'échelle sociale,* dans *laquelle (et non sur laquelle, ou à laquelle) on grimpe. Ou l'*échelle humaine *des phénomènes, dont on se garde bien de donner une autre explication, et qui est une sorte de mesure idéale, à la "dimension" de "l'Homme".*
>
> *(Brunet et al., 1992/1993, p. 176)*

Pourquoi se garde-t-on d'en "donner une autre explication" ? Le problème est-il trop redoutable ?

Je pense que la psychologie a beaucoup à gagner à définir des échelles en fonction des objets de recherche, et de discuter et constituer collectivement et *dans le détail* des ordres de grandeur pertinents pour les phénomènes étudiés, et non seulement de manière à classer ou établir des comparaisons approximatives. L'emploi de catégories abstraites tels que micro, méso et macro ne spécifie pas les critères des ordres de grandeurs et ne vise qu'un découpage *grosso modo* de ceux-ci, sans mener l'enquête scientifique nécessaire à déterminer les échelons pertinents pour le phénomène étudié [55].

échelles, d'autre part. Les échelles d'observation en psychologie peuvent être confrontées les unes aux autres, et faire l'objet d'un débat théorique spécifique. En outre, il est possible de *changer d'échelle* (au sens rigoureux et non au sens abusif), c'est-à-dire de changer notre définition des ordres de grandeur pour un phénomène donné.

54. La distinction entre *sujet* et *objet* est remise en cause en psychologie culturelle, notamment. Je m'y réfère ici uniquement dans un sens épistémologique, sans en faire une *psychologie du sujet*, à savoir dans un couple dialectique de *sujet connaissant* (ou sujet épistémique) et *objet connu*, ce dernier n'ayant parfois pratiquement rien à voir avec les objets du monde (p.ex. l'énonciateur de "je connais l'amour" peut dire que "l'amour" est l'objet de sa connaissance, même si cet "amour" en tant que tel n'est peut-être *rien* dans le monde, et qu'il n'est certainement pas *un objet* au sens ontologique). Je ne me réfère donc pas à une ontologie permettant de distinguer *objets* et *sujets*, mais utilise ces termes pour désigner les deux termes de la relation dialectique qui consiste, pour quelqu'un, à *connaître* quelque chose.

55. Comme pour toute remarque générale de ce genre, il est possible de trouver des exceptions. Par exemple Tiberghien (1997) ou Leutenegger (2000) proposent une discussion explicite des critères de leurs ordres de grandeur. Ceux-ci sont néanmoins définis en relation au contexte scolaire - à l'institution - plutôt qu'en relation au phénomène étudié de manière à constituer une échelle commune aux sciences humaines. La justification de l'échelle ne fait alors pas référence à une perspective théorique sur l'apprentissage, mais elle est plutôt présentée comme un choix méthodologique justifié par les contraintes de l'analyse (on ne peut tout analyser à la fois). Sensevy (2011) discute explicitement du problème d'une "échelle" relative aux phénomènes étudié et dénomme les ordres de grandeur proposés "niveau d'échelle" (p. 190), ce que j'ai nommé "échelon" en référence à l'usage en géographie reporté par Bruner. Sensevy (2011) prend justement les travaux en didactique de la physique de Tiberghien comme exemple du "jeu d'échelle" (p. 441) qui informe la recherche, c'est-à-dire la possibilité d'analyser à plusieurs niveaux en même temps les mêmes traces empiriques pour construire une description plus complète des phénomènes étudiés. S'il s'agit ici aussi plutôt d'une réflexion méthodologique qu'épistémologique, Sensevy souligne néanmoins la question

Pour les raisons évoquées ci-dessus, je ferai usage dans cette recherche d'une échelle pour le problème que je me suis posé : le problème des conceptions des apprenants en physique, que je pourrai justement aborder, après réflexion quant à l'échelon pertinent, comme des *situations de malentendu*. Proposer une échelle permet notamment de considérer qu'il s'agit du même phénomène que documente la littérature, tout en l'abordant à des *échelons* spécifiques et partiellement différents des recherches précédentes.

2.2.1.3 Les apports d'une échelle explicite

Cette section met en évidence trois problèmes sur lesquels une discussion explicite d'une échelle permet d'avancer dans la théorisation de l'apprentissage des sciences :

1. Le problème des inclassables lors des catégorisations des réponses des élèves.
2. Le problème des taches aveugles des focalisations adoptées par tradition, en particulier lorsque l'échelon individuel est utilisé pour étudier la cognition.
3. Le problème de la variabilité des réponses pour une même personne au fil du temps ou à des tâches différentes censées évaluer les mêmes connaissances, savoirs ou compétences.

Le problème d'échelle soulevé ci-dessus permet-il d'apporter, à partir des trois points cités ci-dessus, un nouvel éclairage des recherches orientées sur les conceptions des apprenants ?

Le problème des inclassables

Toute démarche de recherche visant à attribuer les participant-e-s à des catégories comme celles constituées par les conceptions décrites dans la littérature se confronte au problème des "inclassables" : certaines réponses ne peuvent être rangées dans aucune des conceptions définies par les chercheurs [56]. Soyons clairs : dans bien des cas, les chercheurs sont amenés à faire entrer des réponses dans une catégorie de conceptions seulement partiellement adéquate, voire partiellement contradictoire avec le contenu de la réponse, par exemple lorsque celle-ci comprend justement un contenu paradoxal ou contradictoire du point de vue de l'expert-e. Une telle pratique d'analyse est évidemment légitime dans une démarche de recherche, en particulier si celle-ci vise à obtenir des résultats sous la forme de tendances générales, basées sur un grand nombre de participant-e-s. Il s'agit après tout de constituer une marge d'erreur, acceptable à plus forte

épistémologique de l'articulation entre ces "niveaux d'échelle" ou niveaux d'analyse et, surtout, se pose la question de savoir s'il y a un niveau privilégié en fonction des objectifs de la recherche. Cette question me paraît particulièrement importante. La différenciation des niveaux demeure néanmoins très générale chez Sensevy (2011), se limitant aux trois niveaux micro, méso et macro sans justifier cette restriction à trois catégories. Le premier niveau (micro) comprend les recherches visant la reconstruction du sens donné par les acteurs, le second comprend celles qui visent à étudier les événements - comme la description des apprentissages effectués par les élèves - et au troisième niveau les recherches qui visent à reconstruire les structures qui donnent du sens aux événements.

56. Et cela même si de telles conceptions sont, dans un premier temps, constituées inductivement à partir des réponses des participant-e-s : le processus de catégorisation lui-même conduit à prendre en compte des tendances majoritaires et à *forcer le classement* pour les réponses originales. Il n'est peut-être pas inutile d'ajouter que les chercheurs qui prennent en considération ces réponses originales pour remettre en question leur modélisation (voir p.ex. : Becker, 2016) échappe naturellement à la critique que j'énonce ici, puisque dans ce cas il y a considération des "inclassables" dans une boucle rétro-active entre le chercheur, ses outils et ses observations.

raison que les données sont nombreuses et qu'une telle approximation [57] ne porte pas conséquence sur la manière de répondre aux questions de recherche. Par contre, il s'agit d'un problème plus sérieux lorsqu'il s'agit d'expliquer les processus à l'œuvre dans l'apprentissage, soulevant l'une des questions au cœur du débat sur le changement conceptuel : si certaines réponses d'apprenants apparaissent contradictoires ou paradoxales à l'expert-e, peut-on vraiment considérer que le fonctionnement cognitif de l'apprenant se réfère à une conception (cohérente, stable, etc.) ?

Viennot (1996), dont nous avons vu qu'elle se méfiait des concepts de *représentations* et de *conceptions*, signale le problème méthodologique qui se pose au chercheur :

> *Bien sûr, il faut éviter de sacraliser l'erreur, dans l'un de ces mouvements pendulaires qui menacent toujours la pensée sur l'éducation. Toute erreur n'est pas l'émergence d'un iceberg de pensée commune constituée. Il y a aussi l'inattention, la faute de calcul non dirigée, la réponse qui cherche une allure qui plaise au professeur, il y a aussi bien le "n'importe quoi" dû à de multiples causes. Et d'ailleurs l'analyse proposée ici ne fournit pas toujours le moyen de décider de façon incontestable, pour une réponse individuelle donnée, quel est le pourcentage exact de "sens" et de "n'importe quoi" dans ce qui l'a suscitée.*
>
> *(Viennot, 1996, p. 228)*

Si elle ressemble davantage à l'expression d'une observation directe qu'à une théorie, cette remarque de Viennot soulève un enjeu important de la modélisation de l'apprentissage et, plus particulièrement, du défi méthodologique de l'analyse des conceptions des apprenants. Viennot relève également, dans une autre publication, le problème que rencontrent les recherches cherchant à mettre en évidence des conceptions des élèves en classant leurs productions par catégories :

> *Pour être efficace, la description doit être organisée, et pour cela on est amené à dégager les caractéristiques des productions d'élèves qui "vont-le-mieux-ensemble". On l'a dit plus haut, ces rapprochements ne se font que par tâtonnements successifs. Une fois bien cernés, ils peuvent conduire à des résultats massifs, extrêmement stables d'une population à une autre distincte par l'âge, la nationalité, le style d'enseignement reçu, la culture... Dans cette recherche, il peut être dommageable de s'enfermer trop vite dans certaines catégories. En particulier, celles que suggère l'analyse des difficultés historiques constitue un guide important pour l'enseignant et le chercheur (voir par exemple [9]), mais qu'il importe de savoir relativiser [10] sous peine d'introduire des distorsions importantes dans l'analyse des difficultés actuelles des élèves.*
>
> *(Viennot, 1989b, p. 905)*

L'auteure propose de considérer les représentations ou conceptions comme des *constructs*, inexistants ou du moins inconnaissables.

1.3. Des raisonnements non classables par concept de la physique

57. Toute démarche scientifique est bien obligée d'être délimitée par des approximations, limites ou marges d'erreur, et c'est bien plus la pertinence du choix de ces limites qui importe au final.

> *Il n'est donc pas possible de dire : "pour les étudiants, la notion de force, c'est ceci ou cela", ni même : "la loi fondamentale la dynamique est remplacée, dans le raisonnement naturel, par une relation linéaire entre force et vitesse". Ce dernier énoncé est à la fois réducteur - on n'y voit pas l'attribution d'un capital dynamique à l'objet - et faux, pour toutes les situations- telle une chute libre vers le bas - où les étudiants voient très bien qu'une force constante- telle le poids, vers le bas - lui aussi peut produire une accélération.*
>
> *(Viennot, 1989a, p. 955)*

Dans l'approche cognitive faisant référence à des modèles mentaux ou à des concepts (dont on cherche à examiner les changements), ces modèles ou concepts sont délibérément définis du point de vue de l'expert (Carey, 1991). Les chercheurs ne cherchent donc pas à définir les conceptions des apprenants à partir de leur expression propre, mais appliquent à la pensée en construction des modèles ou concepts aboutis pour l'examiner de ce point de vue là. Par conséquent, le problème des inclassables est d'autant plus aigü, et, en outre, les résultats de ces recherches sont confrontés à une difficulté supplémentaire qui est celle d'une forme d'ethnocentrisme de l'adulte et du professionnel (Schubauer-Leoni & Perret-Clermont, 1985/1991) : examiner la pensée en construction uniquement du point de vue de son point d'aboutissement (supposé) ne permet pas, évidemment, de rendre compte de sa logique propre. Or, il est connu aujourd'hui [58] que cette pensée en construction n'est pas simplement une accumulation d'éléments qualitativement semblables à la pensée construite (quelle qu'elle soit) selon une logique purement combinatoire et additive, mais qu'elle change qualitativement en se construisant.

La réflexion sur l'échelon pertinent pour l'observation des processus d'apprentissage permet d'aborder autrement le problème des inclassables. Toute recherche qui se donne pour objectif d'attribuer des conceptions définies en termes généraux aux individus procède, à un moment ou à un autre, au classement des réponses des participants à la recherche selon des conceptions-types pour une tâche, qu'elles soient définies avant ou après la constitution des traces. Lors de ce classement des réponses, un nombre plus ou moins important de cas ambigus apparaissent, pour lesquels aucune des catégories définies ne correspond ou, pour le moins, pour lesquels le classement suscite des doutes. Or, dans la littérature de recherche, les prises de décision des chercheurs face à ces réponses "inclassables" sont rarement explicitées dans le détail, pour des raisons évidentes d'espace disponible dans les publications, et si elles ne consistent pas plus simplement à écarter les traces concernées comme étant "hors de propos" ou "incompréhensibles". Pourtant, ces réponses "inclassables" peuvent remettre en question également l'interprétation que font les chercheurs des autres réponses, comme je tenterai de l'illustrer dans cette recherche.

Dès lors, lorsque les chercheurs attribuent des conceptions individuelles aux participants à la recherche, le caractère *individuel* de ces conceptions n'est pas un résultat de recherche, mais une décision du chercheur qui force, si nécessaire, les traces dans les conceptions-types qu'il ou elle a définies, ou élimine les traces qui ne se laissent pas assimiler de la sorte.

58. La psychologie génétique, par exemple, en donne de nombreuses illustrations expérimentales.

La réflexion sur l'échelon choisi pour l'observation d'un phénomène nous rend donc attentif à ce qu'une recherche construite pour attribuer des conceptions individuelles aux participants ne produit que des résultats concernant cet échelon particulier : une telle recherche ne permet pas d'affirmer que les apprenants ont ou n'ont pas de conceptions individuelles, puisqu'elle n'observe rien d'autre, mais uniquement d'affirmer quelles conceptions individuelles les participants auraient s'ils avaient, justement, des conceptions individuelles.

Ainsi, la difficulté constatée par ces recherches à faire évoluer ces conceptions individuelles peut être réinterprétée comme un indice que ce ne sont pas les *conceptions individuelles* des participants aux recherches qui ne changent pas, mais que c'est l'ensemble de la *situation* de mesure de ces recherches qui, en tant que *situation de communication* entre les chercheurs et les participants, produit de manière relativement stable les mêmes difficultés. Autrement dit, plutôt que d'attribuer les (médiocres) performances des participants à ces recherches à des tâches de sciences à des conceptions individuelles, nous pourrions l'attribuer au couple dialogique *question des chercheurs - réponses des participants*. Cette hypothèse paraît d'autant plus vraisemblable que les tâches soumises aux participants de ces recherches sont souvent du même genre. La conclusion de Milne, Kirch, Basu, Leou, et Fraser-Abder (2008), formateurs et formatrices d'enseignants ayant examiné le débat entre approche culturelle et l'approche du changement conceptuel, va dans le sens de cette reconceptualisation en remettant justement en cause la stabilité de l'approche pédagogique utilisée plutôt que d'éventuelles conceptions individuelles stables, pour expliquer les difficultés de cette littérature de recherche :

> *Our discussions and struggles to make sense of the arguments and analyses of the papers in this set on conceptual change have led me to wonder if some of our struggles are associated with our unease that conceptual change research is an answer-centered approach to research about learning ? Misconceptions research is based on an understanding that the researchers and, perhaps teachers, know the correct ways to represent a conception and anybody who does not represent the conception in that way has a misconception. This answer-based view of learning does not value the knowledge and ways of being that students bring to a context. From an answer-based perspective, because the answer is already known, the student's role is to find that answer and reproduce it—that is the nature of conceptual change. If instead of an answer-based approach to learning, we adopted a question-based approach would concepts such as misconceptions exist ?*
>
> *(Milne et al., 2008, pp. 432-433)*

Leur proposition consiste à inviter à remettre sur pied d'égalité enseignants ou toute forme d'expert-e-s, et élèves ou toute sorte d'apprenants : ce que nous tentons ici avec la notion de malentendu. Et les auteurs de conclure en s'imaginant une telle approche mise en oeuvre dans la pratique enseignante : "We would not need a multitude of implementation strategies for teaching and learning that would include conceptual change strategies. We would just need teachers to understand the nature of inquiry." (Milne et al., 2008, p. 433).

Même si la question soulevée par ces auteurs s'oriente sur la pédagogie plutôt que sur l'épistémologie, elle touche directement au problème d'échelle discuté plus haut. En effet, l'idée d'une pédagogie "question-based" correspond à la prise en considération, lors des analyses des réponses des élèves en classe, de la question qui leur est posée. C'est ce à quoi conduit le passage d'un échelon d'observation individuel à un échelon situationnel : pour une observation à l'échelon situationnel, il ne suffit plus de décrire les questions posées aux participants, les tâches ou problèmes utilisés pour susciter des réponses, il devient indispensable d'*analyser* le matériel scolaire ou de recherche fournis, les questions et tâches proposées, à pied d'égalité avec les réponses des participants à la recherche, entre autres[59]. Dans les recherches focalisées sur l'échelon individuel, ces questions et conditions sont décrites pour la méthodologie, mais ne sont généralement ni discutées ni prises en considération par les chercheurs au moment de l'analyse des productions des participants : les chercheurs attribuent directement des conceptions aux élèves à partir de leurs réponses à une question ou un problème à résoudre, ayant déterminé *par ailleurs* quelle réponse indique quelle conception, en ne prenant en compte que leur point de vue de chercheur, celui de l'enseignant et ceux des élèves.

En outre, l'échelon d'observation individuel ne permet pas d'observer les apprenants en relation à un contexte. Comme nous l'avons vu au niveau épistémologique, à chaque échelon correspond une potentielle observation et mise en évidence, mais aussi des taches aveugles.

Les taches aveugles de l'échelon individuel

La théorie du *Knowledge-in-pieces* ne rencontre par le problème de la catégorisation au même titre que dans les travaux sur le changement conceptuel qui considère que l'apprenant se réfère à des conceptions cohérentes, puisque dans cette théorie on considère que le concept se construit progressivement. Par exemple, la démarche de diSessa (1993b) consiste à rechercher les mécanismes cognitifs sous-jacents du système des connaissances/savoirs :

> *The aim of this work is twofold : to understand the intuitive sense of mechanism that accounts for commonsense predictions, expectations, explanations, and judgments of plausibility concerning mechanically causal situations and to understand how those intuitive ideas contribute to and develop into school physics. To facilitate this, I provide a framework for describing and correlating characteristics of weakly organized knowledge systems. The framework is aimed at answering, at a coarse level of detail, a set of questions central to a full theory of knowledge : What are the elements of knowledge ; how do they arise ; what level and kind of systematicity exists ; how does the system as a whole evolve ; and what can be said about the underlying cognitive mechanisms that are responsible for the normal operation of the system and its evolution ?*
>
> *(diSessa, 1993b, p. 105)*

59. La liste de ce qui est à prendre en considération pour rendre compte d'une *situation* est longue, voire infinie pour qui voudrait l'établir en général, les éléments pertinents pour une situation singulière variant selon les cas.

Cette approche choisit pour échelon d'observation des structures cognitives individuelles (dénommées "mechanisms"), fonctionnant comme des causes cachées au fonctionnement psychique. Or, il s'agit justement d'une attitude épistémologique que Bruner (1991a) considère inadaptée à l'étude de la pensée, du fait qu'elle *postule* des causes cachées au fonctionnement psychique pour se donner une apparence de scientificité[60]. La science, pourtant, peut tout à fait s'intéresser aux phénomènes tels qu'ils sont observés par tout un chacun, et les expliquer également par les *significations* dont traite également la psychologie populaire, plutôt que par des causes cachées qui seraient forcément inaccessibles sans appareillage technico-méthodologique. L'ironie d'une approche qui postule des mécanismes cachés consiste au fait qu'en *choisissant* ainsi son échelon d'observation, l'observation effectuée devient aveugle aux significations et à ses processus tels que la sémiose, la médiation symbolique et l'interprétation, alors que c'est peut-être justement à ce niveau-là que les processus recherchés sont observables, au sens où les phénomènes recherchés n'existent qu'à un échelon spécifique[61].

La variabilité des réponses d'un même individu

Un autre problème rencontré par les approches au niveau d'observation individuel est celui de la variabilité des réponses du même individu. Howe et al. (1995) souligne ce problème et le défi que cela pose au niveau théorique :

> *Such variability [within one individual answers] suggested that, although the collaborative experience may have stimulated scientifically relevant conceptions, it may not have eliminated scientifically irrelevant conceptions...*
>
> *(Howe et al., 1995, p. 485)*

C'est sans doute la méthodologie minutieuse qui permet à cette recherche de mettre en évidence ce problème, qui est souvent sous-estimé par les chercheurs qui comptent sur la cohérence des réponses des apprenants. La variabilité des réponses d'un même individu à un problème considéré comme similaire pour l'expert-e constitue l'une des taches aveugle de ce niveau d'observation, à moins de multiplier les contextes de stimulation de réponses afin de justement observer une telle variation. Certains travaux plus récents sur l'apprentissage conceptuel ouvre le champ d'investigation à l'aspect *situé* des connaissances/savoirs en procédant de la sorte (voir p. ex. : Tiberghien, 2007).

L'alternative cognitive consiste à étudier des tâches expérimentales suffisamment simples pour inférer les conceptions ou les changements conceptuels des élèves à partir de réponses comportementales. Cependant,

60. L'impact de l'invention du microscope dans l'histoire du développement des sciences de la nature n'y est probablement pas étranger, puisqu'il illustre brillamment cette idée d'une technologie permettant de révéler les mécanismes cachés de la nature. Or, on oublie dans cette version vulgarisée de l'histoire des sciences, non seulement que le microscope tout seul ne révèle rien du tout - il faut tout un ensemble de théories et d'observations fines pour produire des résultats - mais aussi que l'intégration de ces résultats dans la science procède justement d'une réflexion et d'une avancée sur le problème d'échelle mentionné, et sur le fait qu'à des ordres de grandeur différents les "lois de la nature" ne sont pas les mêmes. Cette idée a d'abord suscité de nombreuses résistances.

61. La composition d'une molécule d'eau, écrite par exemple H_2O, ne rend pas compte de la *capillarité* de l'eau, phénomène qui s'explique à un échelon plus macro à l'aide des forces exercées à la surface d'un liquide au contact d'un solide.

Vosniadou (1991) remarque avec pertinence qu'étudier l'apprentissage en général avec des tâches de laboratoire n'est pas correct : l'apprentissage dépend trop du contenu à apprendre pour être abordé ainsi. On retrouve ici la remarque générale au fondement de la constitution des didactiques. Selon Vosniadou, il faudrait établir les bases pour le développement d'une psychologie de l'apprentissage et de la culture qui traite de la manière dont la culture affecte la nature de l'apprentissage. C'est un appel à ne pas seulement considérer comment l'individu internalise la culture (scripts, schemata, mental models, p.ex.) mais à également traiter le pendant externalisant, c'est-à-dire comment nous créons nous-mêmes la culture.

Des recherches qui se démarquent par rapport à l'échelle

Il y a bien entendu des travaux, dans la littérature du changement conceptuel, qui se démarquent de la pratique courante qui consiste à attribuer des conceptions aux apprenants. Dykstra et al. (1992), par exemple, présentent une alternative intéressante a l'attribution des conceptions aux apprenants. Au lieu d'attribuer les conceptions aux apprenants, ces chercheurs tentent de les représenter sous forme de *structures schématiques* afin d'en capturer les propriétés essentielles pour l'enseignement.

> *. . . we believe that the meanings of the words students use to describe various situations and to explain their problem-solving actions must be organized into a representation which would enable us to determine how their conceptions are related to the categories they use to classify what they know about the world. this is a rational reconstruction of their conceptual knowledge.*
>
> *(Dykstra et al., 1992, p. 619)*

En invitant à produire une *taxonomie du changement conceptuel* décrivant, à l'aide de schéma ou *conceptual map*, les changements progressifs des conceptions d'un ensemble d'élèves, Dykstra et al. (1992) quittent le niveau d'observation individuel pour celui des significations (représentées par les schémas). Un autre exemple de recherche prenant du recul quant à l'échelon d'observation est celle de Koponen et Kokkonen (2014), qui abordent la différenciation progressive des concepts avec une approche systémique, considérant les concepts en tant que tels comme objets d'étude, qu'ils investiguent en tant que "structures complexes évoluant de manière dynamique" (Koponen & Kokkonen, 2014, p. 140, traduit par l'auteur). Les traces récoltées par ces chercheurs permettent de modéliser le développement de ces structures, notamment en relation à leurs trajectoires liées aux individus, mais montrant le lien entre les significations (les "structures" plus ou moins différenciées des concepts [62]) et d'autres éléments, comme les effets de la communication et du contexte.

2.2.1.4 Synthèse : un objet de recherche qui risque d'échapper au regard

La majorité des données utilisées dans les recherches du *conceptual change* sont effectivement basées sur les réponses verbales des participants (Spada, 1994, p. 114), alors que la question de la communication ou de l'interprétation du sens n'est pas abordée explicitement. Le problème d'échelle identifié ci-dessus permet

62. Cette démarche constitue une tentative concrète et originale d'adopter "le point de vue du savoir", selon l'expression de didactique des sciences francophones, en allant au-delà d'une simple métaphore.

de prendre conscience que cette littérature se focalise le plus souvent sur un échelon d'observation à hauteur de l'individu, en se focalisant sur les *réponses individuelles à une question ou un problème donné*[63]. Dans certains travaux, une plus grande sensibilité au contexte d'explicitation des réponses permet de ne pas être aveugle au caractère situé de telles réponses. Néanmoins, sur le plan théorique, l'explication par les chercheurs des réponses ou comportements observés par les conceptions des apprenants situe l'observation à l'échelon individuel, du fait de l'assomption qu'ils font que le même individu réponde en raison de propriétés idiosyncratiques telles qu'une structure cognitive, qu'elle soit dénommée *conception* ou autrement.

Or, à cet échelon d'observation individuel, plusieurs taches aveugles échappent aux investigations scientifiques :

1. Les processus d'interprétation des consignes, des questions et des tâches ne sont pas discutés ni rendus visibles par la recherche de conceptions caractérisant les individus. Cette tache aveugle donne lieu à des réponses originales qui apparaissent comme inexplicables dans la théorie des chercheurs.

2. La variabilité des réponses des apprenants selon les questions, les contextes, le moment est presque toujours occultée, l'évaluation mise en œuvre dans la recherche passant pour un révélateur de conceptions existantes de manière stable indépendamment de leur "mesure".

3. Selon le cadrage théorique, c'est tantôt la résistance au changement des conceptions (si elles sont considérées comme la somme d'éléments fragmentés), tantôt leurs contradictions internes ou leur variabilité inter-situations (si leur cohérence est surévaluée par le niveau d'observation) qui paraît inexplicable.

2.2.2 Une épistémologie perspectiviste

L'*épistémologie perspectiviste* désigne ici la position épistémologique proposée par Piaget (1967b) en tant qu'*épistémologie relationnelle* ou *dialectique* (pour une explication plus détaillée de ce lien, voir : Kohler, 2020), que Bruner (1991a) distingue précisément du *relativisme*, position selon laquelle tous les avis se valent, et de la position *positiviste*, selon laquelle il ne peut y avoir qu'une seule expression ou démarche pour la connaissance : le *perspectivisme* permet d'accepter que plusieurs perspectives amènent à mieux connaître un même objet d'étude, mais aussi que ces perspectives peuvent se révéler inégalement pertinentes relativement à l'objet étudié et relativement aux objectifs de la démarche de connaissance.

63. C'est-à-dire que ce qui est considéré comme des "données" (data) pour les chercheurs opère à une sélection d'une certaine envergure, ici le plus souvent centrée exclusivement sur les réponses ou conduites individuelles des participants : les rapports complexes qu'entretiennent les réponses avec les questions posées sont rarement discutés, par exemple. Que ces réponses soient verbales ou comportementales ne change rien à l'échelon d'observation que les chercheurs déterminent ainsi : réponses verbales ou comportementales sont considérées comme des données fournissant des indices des conceptions des participants et, en conséquence, les chercheurs se focalisent sur ces conceptions individuelles (dont ils supposent au préalable l'*existence*).

2.2.2.1 Rapports entre les questions ontologiques et épistémologiques

Prenons un exemple en physique. L'étude de la lumière a été, pendant très longtemps, une énigme qui semblait insoluble : deux théories s'affrontaient (la théorie de corpusculaire et la théorie ondulatoire), ayant chacune des arguments en leur faveur mais ne pouvant expliquer certains phénomènes précis. Il est aujourd'hui accepté que les deux théories sont vraies (une affirmation ontologique), mais la contradiction entre elles n'a pu être levée qu'en acceptant que n'importe quelle matière est de nature *ondulatoire*, quoique celle-ci demeure inconnaissable à une échelle d'observation trop grossière (une affirmation épistémologique) :

> *Les principes que de Broglie avait été le premier à émettre se sont vérifiés au cours de toutes ces expériences, ce qui enlève tout doute sur la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la matière. (...) La seule difficulté c'est que, lorsque les particules sont de taille très supérieure à celle d'un atome, leur longueur d'onde devient si petite qu'il n'y a aucune chance de détecter leurs propriétés ondulatoires.*
>
> *(Boulind, 1974, p. 59)*

Autrement dit, les chercheurs ont pu proposer une réponse à la question ontologique - quelle est la nature de la lumière ? - lorsqu'ils ou elles ont changé d'échelon d'observation [64], c'est-à-dire qu'ils ont problématisé la question épistémologique - que peut-on savoir et comment ? - de manière à adopter une nouvelle perspective sur le phénomène. Particulièrement intéressant pour le phénomène de la lumière, celui-ci permet de construire un modèle différent et également pertinent à deux échelons : le modèle des ondes et le modèle des particules. Mais il s'agit là d'un résultat empirique : il était tout à fait possible, et c'est d'ailleurs ce que la majorité des physiciens pensaient, que seule l'un des deux échelons investigués permette effectivement de nous renseigner sur la nature du phénomène.

Ces quelques exemples en physique permettent non seulement de montrer le lien entre la posture épistémologique sur un objet de recherche en particulier - ce que l'on peut en connaître et comment - et le résultat des recherches visant des affirmations ontologiques - ce que l'on dit de la nature des phénomènes étudiés.

Le débat, en psychologie cognitive, sur la question de la nature des conceptions, ou des connaissances/savoirs, s'attaque d'emblée à la question ontologique : *que sont-elles* ? Or, il me paraît indispensable de d'abord se poser la question épistémologique - *que peut-on savoir de ces conceptions et connaissances/savoirs ?* - avant une éventuelle prise de position au niveau ontologique, car la question épistémologique fournit les limites et les fondement de l'enquête sur le phénomène des conceptions ou connaissances/savoirs en spécifiant ce qu'il est possible d'étudier scientifiquement, comment et avec quels présupposés. C'est l'idée de Piaget d'une *épistémologie empirique* : construire *empiriquement* une théorie qui puisse rendre compte de la possibilité de la connaissance humaine.

64. Plus précisément, la "grandeur" dont il s'agit ici d'effectuer l'observation à l'échelon adéquat pour répondre à la question posée est celle de *l'action* (une distance · une impulsion, ou une énergie · une durée) et non celle d'un "objet", et la valeur discriminante est la constante de Planck.

Cet assujettissement de la question ontologique à la question épistémologique a fait l'objet de critique, par exemple par von Wright (1971), pour qui le débat épistémologique est sans conséquences sur ce qui est considéré comme *vrai* au niveau ontologique. Je ne partage pas cette prise de position de Wright, car je souscris à l'idée suivante : il y a des manières d'étudier (épistémologiquement) un phénomène ou objet particulier plus pertinents que d'autres pour le connaître (ontologiquement). Les exemples des sciences physiques cités ci-dessus en fournissent quelques illustrations parmi les innombrables cas de découvertes scientifiques où cette idée se vérifier historiquement. Cette idée est une expression du perspectivisme, qui constitue mon postulat fondamental, et qui repose lui-même sur quelques principes pragmatiques qu'a identifié Giere (2006) en montrant que l'épistémologie perspectiviste peut très bien s'appliquer à elle-même sans poser de problème de type *paradoxe* ou *régression à l'infini*. C'est précisément l'assomption d'un seule et unique perspective [65] pour connaître le monde, si courante en philosophie, qui conduit à séparer ontologie et épistémologie, en faisant de la première une pure spéculation, et de la seconde une science inutile et inefficace, c'est-à-dire incapable de tirer des conséquences quant aux limites de nos connaissances sur le monde. c'est-à-dire au niveau ontologique. Placer le débat au niveau épistémologique ne signifie pas non plus, à mon avis, que l'on souscrit à une forme de *relativisme* où toute affirmation ontologique est égale, faute d'une possibilité suffisante de connaître le monde pour trancher entre les diverses options. En effet, je ne pense pas qu'il soit nécessaire d'avoir une connaissance parfaite ou totale de l'objet dont on souhaite faire une étude pour pouvoir énoncer quoique ce soit au niveau ontologique, ou proposer quelque hypothèse sur l'objet. Ici aussi, ma posture repose sur le postulat d'une épistémologie perspectiviste qui consiste à augmenter incrémentalement et par discussion et débat la connaissance d'un objet ou phénomène au fur et à mesure de la multiplication des perspectives utilisées pour l'étudier, et de leur coordination, notamment à travers une discussion argumentée.

Les exemples en physique cités ci-dessus nous invitent également à considérer l'éventualité suivante : certains problèmes demeurent insolubles tant que la recherche et la théorisation d'un phénomène particulier n'est pas au niveau adéquat sur l'échelle. C'est ce qui est arrivé au cours de l'histoire des sciences de la nature, et qui peut être illustré par de nombreux exemples : la découverte des puces des rats transmettant le bacille de la peste, la possibilité d'observer les bactéries avec l'invention du microscope - qui correspond à l'exploration d'un niveau plus micro dans l'échelle des phénomènes - ou encore la question de la nature de la lumière, citée ci-dessus. Le long travail exploratoire permettant aux scientifiques de choisir et découvrir l'échelon adéquat pour chaque phénomène est encore largement à faire en sciences humaines [66].

65. Le plus souvent une forme de réductionnisme matérialiste et atomiste peu explicite, selon lequel tout phénomène peut être analysé en plus petites parties jusqu'à atteindre, dans les propriétés de la matière physique, les mécanismes qui sous-tendent tout ce qui se passe à un échelon plus macro.

66. À mon avis, le manque de systématicité et d'avancement dans ce travail conduit, à tort, nombre de chercheurs à penser que les sciences humaines sont *par nature* moins scientifiques que les sciences de la nature, ou des sciences "molles" (voir à ce sujet la critique de Grize, 1982, 1997) plutôt que "dures". Au-delà de l'illusion d'objectivité introduite par l'usage du langage mathématique, qui fournit un argument superficiel et fallacieux en faveur d'une différence de nature entre sciences de la nature et sciences humaines, il y a confusion entre une position épistémologique de relativiste (voir à ce sujet Sokal & Bricmont, 1997, p. 195) et le manque de rigueur dans la coopération scientifique que nécessite la construction d'une échelle pour l'ensemble des sciences humaines. Pour Mammen (2018), c'est en fait la distinction elle-même qu'il faudrait plutôt remettre en question, et remplacer par une distinction entre *sciences de l'inerte* et *sciences de la vie*, permettant de reconnaître la différence qu'introduit dans la démarche scientifique l'étude d'êtres vivants ; mais il ne s'agit nullement de considérer, sur cette base, une science plus scientifique que l'autre, ni même - comme l'argumente en détail l'auteur - d'une science pour laquelle les mathématiques seraient plus utiles ou appropriées que pour l'autre. Les outils intellectuels que fournissent les mathématiques permettent tout

2.2.2.2 L'importance du choix d'un échelon dans la recherche

Certains problèmes sont insolubles à certains échelons d'observation, comme c'était par exemple le cas de la propagation des maladies avant de pouvoir observer les *bactéries* et, bien plus tard, les *virus* (voir p.ex. : Latour, 1984/2001). Newton, malgré le succès de sa théorie, ne pouvait répondre à la question récurrente de ses contemporains [67], sur laquelle je reviendrai dans l'épilogue : "quelle est cette force de gravitation mystérieuse ?". Certains problèmes théoriques, comme celui de la lumière, ont même tendance à s'inverser systématiquement lors d'un changement d'échelon [68].

Il en va ainsi de la question de la nature *atomique* versus *continue* de l'univers, soulevée depuis Démocrite, le premier atomiste : on croyait avoir définitivement découvert l'atome avec les expériences de la physique moderne, mais ce n'était que le temps d'en arriver à l'échelon d'observation inférieur permettant de distinguer des particules subatomiques. L'analogie avec le débat entre *knowledge-in-pieces* et *theory change* dans la littérature sur les conceptions des apprenants en sciences et le débat sur l'existence ou non d'*atomes* en physique est frappant. Or, ce débat prend la forme d'oscillation dans les positionnements des savants au fil de l'histoire, et finit par être considéré comme un faux débat. Concernant les *atomes*, par exemple, la physique les a finalement admis dans le modèle scientifique tout en acceptant qu'ils se décomposent encore en sous-parties, c'est-à-dire en dénaturant le concept grec original [69], l'idée de "particules indivisibles", tout en continuant à accepter le continu aux échelons où il reste pertinent. Concernant le débat sur l'acquisition des connaissances/savoirs par les apprenants par "petits morceaux" ou dans un processus de *changement conceptuel*, la recherche actuelle n'a pourtant pas permis de concilier les deux aspects en mettant en lumière un ou des processus communs qui expliqueraient l'aspect fragmenté et la résistance au changement des conceptions des apprenants soulignés par les deux théories en débat [70].

La question de l'échelle d'observation des phénomènes apparaît en psychologie ou en sciences de l'éducation comme une question méthodologique, plutôt sous le terme *unités d'analyse* (voir p.ex. : Leutenegger,

autant la modélisation du vivant que de l'inerte, moyennant les précautions nécessaires à toute modélisation, en particulier, toujours selon Mammen (2018), l'introduction d'un "axiome du choix" pour rendre compte de l'irréductible *choix* que peut effectuer tout être vivant.

67. Si cette question est restée sans réponse, la *relativité générale* ou *théorie de la gravitation* d'Einstein, a néanmoins amené une perspective complètement nouvelle sur ce qu'est (était...) un champ de forces. Ce changement de perspective n'est pas (vraiment) une question d'échelle, mais un basculement radical : l'effet d'une masse (vraiment grande...) est une courbure d'espace-temps.

68. Certes, un tel changement a souvent été associé à de nouveaux moyens technologiques, mais la technologie elle-même ne devrait pas être confondue avec la décision - qui elle repose sur des réflexions théoriques - d'observer un phénomène à un autre échelon. Après tout, la technologie n'est pas développée si on n'a pas de bonnes raisons de penser qu'elle nous permettra d'observer quelque chose de crucial. Par contre, certaines observations ont été considérablement retardées dans l'histoire des sciences par manque de moyen d'observation.

69. Le terme *atome* vient du grec $\alpha\tau o\mu o\sigma$, qui signifie *indivisible*, *insécable*.

70. En physique, on vérifie la compatibilité de la nouvelle théorie avec les phénomènes correctement prédits par l'ancienne (par exemple dans la théorie d'Einstein *versus* celle de Newton). Le débat resterait insoluble tant que les chercheurs ne changent pas de niveau sur l'échelle d'observation des phénomènes : est-ce vraiment un changement d'échelle (pas vraiment d'observation dans son cas) qui a conduit Einsein à accoucher de la relativité générale ? En partie oui, dans la mesure où il était coincé entre une action à distance (la gravitation de Newton) et la finitude de la vitesse de la lumière, comme de tout signal... Par contre, en Mécanique Quantique, la dualité onde-corpuscule est un débat hérité de la perspective "classique". Lévy-Leblond, par exemple, parle d'*objets quantiques* ou de *quantons*, et son livre s'intitule *Quantique* et non "Mécanique quantique" : ce serait plutôt l'impasse d'une interprétation de nouveaux objets théoriques à l'aide des concepts hérités de l'ancienne théorie.

2000 ; Sensevy, 2011 ; Tiberghien, 1997 ; Vygotski, 1934/1997). Par exemple, Tiberghien (1997) souligne dans ce passage la nécessité d'étudier l'apprentissage conceptuel en physique à l'aide d'une *granularité fine* :

> *Concerning the learning processes, the research situation is different. If in psychological perspectives, most of the time learning is associated with processes, few research studies in didactics (physics education) focus on this aspect. Only analogy has been extensively studied. Studies on processes need to look in the students activities at the time scale of minutes which is not the scale of acquisition of physics knowledge which could be evaluated. These studies are particularly difficult, to the extent that they are dealing with a complex knowledge such as physics and the physics meaning may be lost in the decomposition of knowledge at a fine granularity level where only processes of logic like induction and deduction might be maintained. If the knowledge corresponds to concepts such as energy, or the inertia principle, the usual decomposition is in rather large pieces like for learning steps on conceptual change as mentioned above in the case of. that principle. However, this size is not sufficient to study processes. Then a relevant decomposition of knowledge to study processes, which would allow relations with learning steps, still is an open question.*
>
> *(Tiberghien, 1997, p. 362)*

Tiberghien (1997) met en évidence le besoin pour la recherche d'étudier les processus d'apprentissage à un échelon micro, mais elle souligne également la difficulté d'une telle entreprise.

Cependant, en faire une question uniquement méthodologique ne suffit pas, à mon avis, car la réflexion sur l'unité d'analyse au moment de concevoir la méthodologie d'une recherche ne conduit pas systématiquement à un choix conscient et argumenté d'un échelon d'observation, situé sur une échelle commune de référence, qui permettrait d'expliciter le pari effectué par les chercheurs sur le plan épistémologique de construire des savoirs scientifiques en focalisant son observation empirique à des échelons spécifiques des phénomènes ou objets étudiés. L'importance de la réflexion en amont des recherches quant à ce problème d'échelle est pourtant apparue dans le cadre des recherches sur les *représentations* en psychologie. Le problème épistémologique que pose la définition de l'échelon où situer, théoriquement, le concept de *représentation* a été récemment soulevé dans un numéro spécial de la revue *Recherches en Education* (Vincent, 2013), dédié à cette question. Ce problème s'applique également aux représentations des scientifiques : je plaide ici pour une prise en compte méta-cognitive de ce problème, c'est-à-dire à ce que les chercheurs utilisent les résultats de ces travaux sur les représentations pour les appliquer à leur propre travail, de manière à pouvoir se positionner sur le plan théorique par une réflexion consciente quant à l'échelon où ils situent les représentations qu'ils construisent à travers les recherches qu'ils mènent. Sur quelle échelle situer un tel positionnement ?

En psychologie, Doise pose le problème de l'articulation entre les recherches en psychologie, d'abord sur le phénomène des relations entre groupes (Doise, 1976), puis pour plusieurs phénomènes de la psychologie sociale (Doise, 1982). Il fait référence au problème d'échelle avec le terme méthodologique *niveaux d'analyse*, dans un travail de méta-analyse des recherches de psychologie de l'époque, qu'il classe selon quatre niveaux. On trouve dans l'approche de Doise cette idée qu'un même phénomène peut être abordé selon

chacun des quatre niveaux différents de manière à produire des résultats complémentaires, et même que certains problèmes ne trouvent leur explication qu'à un échelon donné, et qu'identifier cet échelon est en soi un long travail (collectif) des chercheurs occupés à une question bien précise. Pour Doise, l'articulation des *niveaux d'analyse* utilisés dans les recherches constitue un objet d'étude de la psychologie sociale. Je reprends ici cette idée en proposant un léger déplacement : plutôt que restreindre la question à un objet d'étude spécifique à la psychologie sociale et à un problème méthodologique, il me semble que la question d'une échelle d'observation des phénomènes concerne toutes les sciences, sciences humaines comprises, ce qui en fait un problème épistémologique.

Cette section visait à remplir l'un des objectifs de cet *intermède épistémologique* : montrer que le problème d'échelle est une question résolument *épistémologique* - un choix du chercheur qui se construit en référence à l'état de la littérature scientifique dans un domaine - et pas d'un problème uniquement *méthodologique*, au sens restreint que les termes "niveaux d'analyse" et "unité d'analyse" peuvent induire. La question méthodologique des niveaux d'analyse est une question qui a évidemment sa pertinence, mais elle ne peut être traitée sans hypothèse(s) - même implicite(s) - quant à l'échelon d'observation choisi pour construire les savoirs scientifiques visés par la recherche, c'est-à-dire sans hypothèse(s) épistémologique(s). Or, lorsque ces hypothèses épistémologiques ne sont pas distinguées des décisions méthodologiques, elles demeurent le plus souvent implicites et procèdent par imitation d'autres recherches ou par tradition, ce qui ne permet plus de poser un choix explicite et conscient en amont de la recherche, avec son argumentation idoine, quant à l'échelon auquel la question de recherche posée est susceptible d'obtenir une réponse par une observation empirique. Ce choix permet de se tromper, par exemple lorsque de nombreuses recherches ne parviennent pas à trancher la question posée, et d'y revenir pour le modifier et proposer une nouvelle tentative à un autre échelon. Ainsi, ce choix fait partie intégrante de l'étude scientifique d'un phénomène, en ce qu'il peut être l'objet de débat et qu'il constitue l'un des aspects du développement des savoirs scientifiques d'un domaine.

2.3 Aborder l'apprentissage par les *situations de malentendu*

2.3.1 Vers une résolution du débat sur les *conceptions*

Nous avons brièvement examiné quelques apports généraux à la théorisation du phénomène des conceptions des apprenants en physique qui découlent de l'usage explicite d'une échelle pour l'étude de ce phénomène.

Je propose à présent d'aborder l'épineuse question de l'articulation entre les diverses et nombreuses approches utilisées par les chercheurs dans cette littérature : peut-on par exemple avancer dans la résolution du "débat insoluble" évoqué plus haut ? Y a-t-il effectivement confrontation entre des hypothèses alternatives dans ces recherches, ou des résultats complémentaires qui peuvent s'intégrer dans un modèle complexe du moment que chaque approche est située par rapport aux autres ?

Une fois le problème d'échelle reconnu, et les perspectives utilisées pour étudier un phénomène explicitées, il devient possible de réfléchir à la coordination entre ces perspectives, une question particulièrement complexe lorsque ces perspectives investiguent justement des échelons différents. Loin de prétendre proposer ici une démarche générale pour la coordination des perspectives en psychologie, je tente néanmoins de fournir quelques éléments de ce travail pour le phénomène qui nous occupe dans cette recherche. Ces réflexions sont présentées en deux temps : premièrement, j'examine les apports d'une échelle explicite sur laquelle peuvent être rapportées les observations des chercheurs, et deuxièmement je propose quelques pistes pour coordonner quelques unes des perspectives utilisées dans la recherche sur l'apprentissage des sciences. Ce second volet est cependant très loin d'offrir une synthèse de la littérature et des perspectives adoptées par les chercheurs dans une coordination permettant d'échelonner chacune des contributions à la recherche sur l'apprentissage des sciences : je me limite, par manque de moyens, à esquisser quelques articulations heuristiques permettant, au mieux, de démêler des malentendus fréquemment observés dans les discussions entre chercheurs, notamment à l'occasion de congrès internationaux.

2.3.1.1 Au-delà d'un constat d'incommensurabilité

Nous avons vu que le débat sur les conceptions des apprenants en sciences, tantôt abordées comme si elles étaient cohérentes, tantôt comme des connaissances/savoirs fragmentaires qui prennent progressivement une structuration plus importante, aboutit finalement lieu à une série de publications (voir p. 32 et suivantes) qui déclarent surfaite l'opposition entre l'une et l'autre thèse. Parmi les analyses conduisant à déclarer qu'il s'agit, somme toute, d'un faux problème, nous avons vu (voir p. 38 et suivantes) celle de Roth (2008a) qui propose une lecture du problème à partir de la perspective de la psychologie discursive. Mais l'examen d'un débat situé en psychologie cognitive par une autre perspective, qui ne partage pas toutes ses assomptions théoriques et philosophiques, soulève immédiatement une question d'ordre épistémologique : comment peut-on évaluer la pertinence d'un débat à partir d'une autre perspective que celles des auteurs ? Comment ces perspectives s'articulent-elles entre elles ?

Il n'y a pas de réponse simple à cette question, et éviter la question n'est pas une solution non plus, puisque cela peut justement conduire la recherche dans un débat insoluble : Roth (2008b) soulève également cette question-ci, dans une autre publication : et si le débat sur les conceptions reposait justement sur la confrontation implicite [71] de perspectives théoriques incommensurables ?

Roth (2008b) identifie les différences de niveau d'observation dans une section dévolue à discuter *l'unité d'analyse*, entre des auteurs prenant une approche cognitive issu du champ de la littérature du changement conceptuel (Treagust & Duit, 2008) et des auteurs de l'approche culturelle centrée sur les interactions sociales (Mercer, 2008b ; Wells, 2008) :

> *There is a difference therefore in the data : Treagust and Duit attribute knowing to individual cognitive frameworks, whereas Wells and Mercer tend to look at the social processes from which memories emerge and that in fact constitute memory.(Roth, 2008b, p. 374)*

Au lieu d'en rester à un constat d'incommensurabilité, je propose de tenter de dépasser cet obstacle à l'aide de l'usage d'une échelle et par l'adoption d'une épistémologie perspectiviste, qui permet de se poser la question de la coordination entre ces perspectives. Peut-être devrons-nous conclure à une incommensurabilité des approches, mais nous pouvons encore tenter d'articuler les perspectives adoptées par les chercheurs avec les échelons effectivement investigués dans leurs recherches, et espérer trouver des critères permettant de discuter la pertinence spécifique de certaines perspectives et à un échelon particulier, de manière à progresser dans la théorisation de l'apprentissage des sciences.

Pour ce faire, il faudrait examiner comment les principales recherches ont traité dans leurs travaux ce problème de l'attribution de conceptions aux élèves ou participants aux recherches, dans une méta-analyse semblable à celle de Doise (1982). Je ne dispose malheureusement pas des moyens de ce travail [72] dans le cadre d'une simple recherche. Je me limiterai ainsi à l'examen de quelques définitions des conceptions, et de quelques pratiques méthodologiques des chercheurs quant à l'attribution de ces conceptions aux élèves : ces échantillons de la littérature me permettent de clarifier le débat en croisant perspectives et échelons d'observation du phénomène.

2.3.1.2 Différenciations des points de vue quant aux connaissances/savoirs

Évitant délibérément l'écueil de l'attribution de conceptions aux élèves, certains travaux de la didactique de la physique se centrent plutôt sur les *processus* par lesquels les apprenants construisent leurs connaissances/savoirs (Devi, Tiberghien, Baker, & Brna, 1996) :

71. Il s'agirait, ici aussi, d'une sorte de malentendu. L'ironie de ce constat consiste au fait que je ne me suis rendu compte que tout à la fin de mon travail de recherche que le point de départ de ma réflexion était ancré dans les malentendus entre chercheurs... mais peut-être peut-on voir dans le fait d'en prendre conscience (finalement) un bénéfice secondaire de la recherche sur les situations de malentendu en classe.

72. Certains travaux discutent effectivement de cette question du rapport entre différents échelons (voir p.ex. : Abreu, 2000), mais sans se rapporter à une échelle commune avec d'autres contributions, de manière à permettre la coordination des perspectives et des échelons sur le phénomène.

> *In this paper, we focus our analysis on the processes by which students construct representations, in relation to the different kinds of knowledge that they already possess (in long term memory), to information given in the problem-solving situation, and to the heuristics used to solve the problem.*
>
> *(...) novices often attempt to work back from formulae presented in the problem statement (means-end resolution), whereas in the case of experts such formulae are derived directly from their representations of conceptual entities. These results are also confirmed by work on students' conception in physics (Trowbridge & McDermott, 1981 ; McDermott, 1984 ; Tiberghien, 1984 ; Viennot, 1993).*
>
> *(Devi et al., 1996, p. 2)*

Ces auteurs montrent qu'une étude centrée sur les processus de construction des connaissances/savoirs par les apprenants permet d'expliquer les mêmes phénomènes qu'ont relevés les auteurs étudiant les conceptions. Pourtant, ces travaux mettent justement l'accent sur *les relations* entre les différents "connaissances/savoirs", ouvrant ainsi une nouvelle piste explicative : les phénomènes de décalage entre les attentes des chercheurs (ou enseignants) et les réponses effectives des participants aux recherche (ou élèves) aux tâches de physique utilisées, pourraient s'expliquer à l'échelon de la relation entre chercheurs (ou enseignants) et participants (ou élèves) plutôt que comme des *conceptions* attribuées aux élèves. Autrement dit, le décalage constaté serait le fait d'une *relation* plutôt que le fait d'un *individu*, auquel on attribue des *conceptions*. Ce changement d'échelon dans l'explication du phénomène permettrait, en outre, une coordination entre cette perspective de didactique des sciences francophone et celle de la psychologie cognitive, du fait que la première se focalise sur la *relation* entre connaissances/savoirs des élèves et connaissances/savoirs des enseignants, alors que la seconde se focalise sur les *conceptions* ("représentations", "modèles mentaux", etc.) des individus. Le focus sur un échelon *relation* conduit les chercheurs à l'étudier au fil de sa construction, la relation étant un processus dont l'état à un moment donné n'est guère observable *per se* : c'est plutôt sa transformation au fil du temps qui permet d'obtenir des indices de son état à un moment donné. Or, le fait de centrer les analyses sur le processus de construction des connaissances/savoirs par les élèves, conduit ces auteurs à expliquer les mêmes phénomènes que décrit la littérature sur les conceptions, quoique sans devoir attribuer des conceptions individuelles aux participants des recherches, ou aux élèves.

Cette coordination des perspectives révèle également que dans la psychologie cognitive et le courant de recherche sur les *conceptions*, la "connaissance/savoir" ("knowledge") regroupe souvent en une seule catégorie des "connaissances/savoirs" construites par les apprenants et les "connaissances/savoirs" telles qu'elles sont définies dans les manuels, ou encore telles qu'elles sont enseignées par les enseignants. Pourtant, plusieurs "connaissances/savoirs" peuvent être différenciés et repérés distinctement dans la situation d'apprentissage : les connaissances/savoirs pris comme référence de ce qui fait une physique correcte par des chercheurs, par exemple, ne peuvent être confondus avec les connaissances/savoirs que les participants ont construites à ce sujet en classe, sinon à considérer dans un dogmatisme objectiviste radical [73] que la seule forme de connaissance humaine qui mérite d'être appelée "connaissance" est celle dont dispose nos

73. Position épistémologique incompatible avec le perspectivisme, bien entendu, et qui fait preuve de naïveté, malgré son apparente scientificité (pour un argumentaire, voir Giere, 2006).

experts occidentaux contemporains ; or, nous savons bien que non seulement des débats restent au moins partiellement ouverts dans tous les domaines scientifiques, mais en plus que les assomptions fondamentales ayant permis l'accumulation des savoirs scientifiques d'aujourd'hui peuvent être remises en cause plus tard, comme cela est déjà arrivé au cours de l'histoire[74]. Cette coordination entre perspectives sur les conceptions et didactique des sciences francophone met en évidence un changement d'échelon - d'un échelon individuel à un échelon relationnel - qui fournit un critère de pertinence : l'échelon relationnel est meilleur en ce qu'il permet de traiter la question de la relation entre les connaissances/savoirs des élèves et les connaissances/savoirs des enseignants. Examinons plus en détail le potentiel de cette question pour le problème de l'apprentissage des sciences.

Plusieurs travaux en didactique des sciences francophone, posent la question de l'adéquation entre les *connaissances*[75] construites par les élèves, et les *savoirs enseignés* - ou même en référence aux intentions didactiques - les *savoirs à enseigner* ("taught knowledge" ou "knowledge to be taught, p.ex. : Tiberghien, 1997) :

> *The term "knowledge" has a broad meaning : it is not limited to content, but includes procedural components on the one hand and embedded epistemology on the other"*
> *(...)*
> *"we introduce the concepts of "knowledge to be taught" and of "taught knowledge".*
>
> *(Tiberghien, 2007, p. 1)*

Tiberghien distingue donc trois niveaux de "connaissances/savoirs" ("knowledge") :

— les *savoirs à enseigner*, décrites ou indiquées dans le curriculum et faisant référence à des savoirs de la culture ;

— les *savoirs enseignés* ("taught knowledge"), c'est-à-dire ce que l'enseignant a effectivement communiqué d'une manière ou d'une autre et qui, de fait, est souvent loin d'être une copie conforme et complète des *savoirs à enseigner* ;

— et les *connaissances* acquises par les élèves, qui ne correspondent aux *savoirs enseignés* et/ou aux *savoirs à enseigner* que dans certains cas.

Ainsi, l'observation mise en œuvre dans ces recherches est plus fine que celle des sciences cognitives : elle ne confond pas dans un terme unique - "knowledge" - que j'ai choisi de traduire par "connaissance/savoir"

74. Remarques auxquelles il faudrait encore ajouter, dans une épistémologie perspectiviste, la question de l'orientation de la perspective scientifique telle qu'elle a été définie au $XVI^{ème}$ et $XVII^{ème}$ siècles, à notre époque où son regard sur le monde et la nature a contribué à conduire l'humanité au bord d'une extinction de masse (Harari, 2011/2015).

75. Je reprends ici l'usage de la distinction entre connaissance et savoir utilisée en didactique des sciences (voir p.ex. : Astolfi, 1992, fournit une explication et des définitions précises, que je présente brièvement pour reprendre ses concepts dans ma perspective, à la section 2.3.2.2, p. 78). L'usage piagétien des termes *savoir* et *connaissance* est justement à l'inverse : le "savoir" était pour lui celui de l'enfant, que l'on désigne plutôt aujourd'hui par "connaissances" (au pluriel), alors que "les connaissances" faisaient pour lui référence à ce que l'on désigne aujourd'hui en sciences de l'éducation comme "les savoirs" (institués) ; Piaget se réservait ainsi un troisième usage, de "connaissance" (au singulier), qu'il employait pour faire référence à la possibilité ou faculté de connaître de l'être humain en général.

pour marquer l'indifférenciation, les *connaissances* que les élèves s'approprient individuellement, des *savoirs enseignés* sous la forme de discours, des procédures mises en œuvre pour réussir une tâche donnée, etc. [76], et des *savoirs à enseigner*, présentés dans les curricula, manuels, etc.

Ces distinctions permettent aux chercheurs d'observer les relations entre les diverses formes d'expression des connaissances/savoirs, selon les points de vue impliqués dans les multiples processus d'enseignement (p.ex. la *dévolution*) et d'apprentissage (p.ex. l'*acquisition* de nouvelles connaissances). Au point de départ de la dévolution se trouvent les savoirs à enseigner, eux-mêmes produit par un processus de développement au sein d'une communauté scientifique et d'une histoire des idées [77]. Les *savoirs à enseigner* qui composent les curriculums et manuels subissent encore des transformations lors de la pratique de l'enseignement, au sein de laquelle se constitue *le savoir enseigné*. Pour procéder à la reconstruction de ce *savoir enseigné* ("taught knowledge"), (Tiberghien, 2007, p. 2) se base sur 1) sa connaissance disciplinaire de chercheure et 2) sur l'observation des pratiques des élèves et des enseignants en classe. Ce cadre d'analyse fournit donc deux univers de référence, et non un seul comme pour la perspective cognitive : le monde matériel, comprenant des éléments de connaissances de type conceptuels, théoriques ou directement liés aux objets et aux événements, et les processus de pensée ou tâches épistémiques, par exemple décrire, sélectionner, interpréter, calculer, procéder à des opérations formelles, évaluer.

Ces distinctions permettent de poser la question des *relations* entre enseignement et apprentissage :

> *Here we consider two characteristics of the relations between teaching and learning : the devolution which means that the teaching situation allows the student to be responsible for the construction of a new relevant aspect of knowledge. The other is the acquisition which, in some cases, can be common to teaching and learning.(Tiberghien, 1997, p. 378)*

La distinction entre *savoirs* et *connaissances* permet également de distinguer plusieurs processus, selon la direction d'ajustement notamment : la transformation des *savoirs* par l'enseignant pour les présenter aux élèves (la *transposition didactique*) n'est pas un processus identique à celui de *dévolution*, par lequel enseignants et élèves effectuent la transmission des tâches scolaires. Pour que l'élève puisse passer des *savoirs* qui lui sont présentés à une construction de *connaissances* qu'il s'approprie, ces *savoirs* doivent être *mis en situation*. Je reviendrai sur l'échelon de la *situation* et sa définition (voir section 3.4.1, p. 222 et suivantes), dont on remarque déjà ici qu'il est incontournable pour l'étude de ces processus.

La dernière phrase de la citation de (Tiberghien, 1997) ci-dessus est particulièrement importante : les processus d'acquisition de *connaissances* (par un individu) ne coïncide lors de l'enseignement et de l'apprentissage *que dans certains cas*. Il me faudra donc proposer une distinction précise entre connaissances des élèves et de l'enseignant, et savoir à enseigner, par exemple. Je reviendrai sur ce point à la section 2.3.2.2 (p. 78).

76. Cette liste est complétée au chapitre 3, section 3.2.4, p. 126 et suivantes

77. Ce niveau n'est pas directement considéré avec une notion par Tiberghien, mais elle y fait référence et il nous paraît important de le rajouter au trois niveaux décrits dans la citation ci-dessus.

Dans cette approche, il devient possible d'exprimer l'idée de malentendu ou, autrement dit, cette théorisation permet de penser le malentendu et de prendre en compte la possibilité de son apparition dans les activités où des élèves sont censés apprendre les sciences. De tels malentendus correspondraient à un état et un moment particulier de la relation entre enseignement et apprentissage : les cas où les connaissances acquises par les élèves ne sont pas celles qui correspondent aux savoirs enseignés, d'une part, et aux objectifs de l'enseignant ou de l'institution, d'autre part. Je reviendrai plus tard sur la définition du malentendu pour cette recherche, qu'il s'agit encore d'établir.

2.3.1.3 Envisager la possibilité de *malentendus*

Si l'on examine cette question dans la littérature sur les conceptions, dans un effort de coordination des perspectives, il apparaît que celle-ci ne laisse pas cette possibilité de malentendu dans sa théorisation. En effet, comme aucune distinction n'est faite entre *connaissances* et *savoirs*, je soupçonne les auteurs cognitivistes, et en particulier les tenants de la connaissance/savoir fragmentaire, de confondre construction de *connaissances* par les élèves et construction - ou *communication* - de *savoirs enseignés* ou de *savoirs à enseigner* ; or, sans différencier les deux, il est *de facto* impossible de comparer les processus effectifs de pensée des élèves - reconstruits à partir des traces disponibles - avec les savoirs visés, puisque les premiers sont assimilés aux seconds.

Il résulte de ce bref examen de l'articulation entre perspectives cognitives sur les conceptions et didactique des sciences que cette dernière - peut-être du fait de sa spécialisation - porte une plus grande attention aux connaissances/savoirs et à leurs spécificités, et observe le phénomène sur une plus grande diversité d'échelons, de sorte que la théorisation que les chercheurs construisent distingue "connaître" ou "savoir" selon les points de vue (pour les élèves, selon l'enseignant, selon le physicien, etc.), et selon qu'il s'agit d'un processus en cours - comme l'acquisition de connaissances pour les élèves en situation d'apprentissage - ou qu'il s'agit d'un produit présenté - comme dans un manuel scolaire.

En outre, l'échelon d'observation relationnel adopté dans cette perspective oriente l'attention sur les processus : ce ne sont plus des *propriétés* individuelles qui sont étudiées, mais les *rapports* entre les *savoirs* et les *connaissances* au fil de l'évolution d'une *situation*. La *situation* constitue néanmoins un échelon important dans la focalisation des travaux de didactique des sciences francophones, alors qu'il est rarement abordé en psychologie cognitive. Cet échelon, même s'il ne fait pas forcément l'objet d'une théorisation explicite développée [78], permet notamment de s'interroger quant aux rapports entre institution (p.ex. l'école), collectif (p.ex. la classe), et individus (p.ex. quelque élève ou enseignant) dans ces processus (p.ex. enseigner, apprendre, mais aussi la dévolution ou la transposition didactique). Il y a là matière à des distinctions encore plus fines quant aux savoirs, sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir au moment de l'opérationnalisation (voir chapitre 5, p. 365 et suivantes).

78. Pour ne prendre que deux exemples, Brousseau (1998/2004) et Vergnaud (1985) propose des définitions différentes de *situation*, tandis que d'autres recherches n'utilisent pas forcément explicitement le concept mais observent effectivement les traces à cet échelon.

Ce premier examen de la coordination des perspectives sur l'apprentissage des sciences attire notre attention sur deux pistes intéressantes :

1. Il y a un échelon qui revêt une grande importance pour cette recherche et qui n'est que rarement mentionné dans les recherches sur les conceptions des élèves en sciences : la *situation*.
2. Selon les perspectives, les recherches se focalisent plutôt des processus en procédant à des observations continuées sur une certaine durée ou, au contraire, se focalisent sur des états en ne faisant usage du temps que pour la mise en place d'une démarche méthodologique, états qui sont ensuite supposés stables.

À présent, je vais brièvement approfondir ces deux éléments pour avancer vers une résolution - partielle - du "débat insoluble" évoqué au début du chapitre.

2.3.1.4 Un hôte indésirable de la méthodologie de recherche ?

Dans la démarche expérimentale, et plus généralement dans l'épistémologie positiviste, la *situation* fait facilement figure de "bête noire" en méthodologie : elle est reléguée aux hôtes indésirables, ou si possible aux oubliettes, notamment pas l'invocation magique du *ceteris paribus* : "toutes choses étant égales par ailleurs"... Or, il y a là guère plus qu'un tour de magicien, qui masque mal son embarras face à la complexité - et surtout face à la singularité - du réel qu'il s'est donné pour mission d'étudier. Il s'agit par conséquent d'une question particulièrement intéressante : selon le perspectivisme et la proposition d'introduire une échelle en sciences humaines, la *situation* est un échelon que les perspectives des chercheurs ont peu exploré. Et pour cause : ce n'est pas facile à théoriser. Le courant situationniste (Debord, 1957/2000) et ensuite la psychologie sociale ont démontré l'importance des situations (voir p.ex. : Zimbardo, 2007 ; Zimbardo & White, 1971) [79], le premier par un militantisme créatif, la seconde dans des recherches sur l'influence qu'exercent les situations sur les conduites adoptées par les individus. La tentative de Lewin (1935, 1959) de faire de la psychologie une science basée sur la théorie des systèmes est remarquable sur cette question, puisque la systémique permet une définition des situations comme état à un moment donné d'un système, système que le chercheur tente de décrire ou de modéliser le mieux possible. En didactique des mathématiques, Brousseau (1998/2004) se base sur la *théorie des jeux* pour modéliser les *situations didactiques*. Ces tentatives formalisantes de prendre en compte la situation dans sa complexité n'ont cependant pas été retenues par les chercheurs, et le *modus operandi* dominant aujourd'hui consiste à mener des recherches probabilistes dans un modèle analytique "causal" ou "multi-factoriel", où la *situation* est au mieux une variable ou une condition de passation.

Pour cette recherche, j'aurai donc besoin d'une définition de *situation*, que je ne discuterai cependant qu'à la fin du chapitre 3 (voir section 3.4.1, p. 222), parce qu'il me paraît particulièrement important de disposer d'un concept cohérent avec la perspective que je construis. J'examinerai donc les nombreuses

79. Ces recherches sont bien entendu trop nombreuses pour être citées toutes, mais celles de Philip Zimbardo sont particulièrement éloquentes quant au rôle déterminant des situations sur le comportement des individus, du fait de la construction artificielle de la situation par un jeu de rôle.

approches psychologiques intégrées à cette perspective avant de choisir une définition de la situation, de sorte qu'elle puisse répondre aux exigences mises en évidence par ces approches quant à l'étude des processus d'apprentissage.

À défaut de modèles, les sciences humaines produisent de nombreuses métaphores. Le triangle psychosocial (Moscovici, 1984/1998) constitue l'une des métaphores les plus utilisés pour représenter une situation sociale. Cette métaphore géométrique est reprise par Houssaye (1993) pour représenter la situation d'enseignement et d'apprentissage, en associant les côtés du triangle à trois processus que la métaphore permet d'explorer à chaque fois selon deux "points de vue" - en fonction des acteurs génériques représentés par les sommets du triangle, à savoir l'élève, l'enseignant et le savoir. Cette représentation de la *situation* d'apprentissage permet une certaine prise en compte des divers *points de vue* impliqués dans une situation, à travers la géométrie du triangle. Cette métaphore du triangle a donné lieu à de nombreuses autres variantes, pour une discussion de ces variantes voir p. ex. : Ferrari, 2007 ; Martin, 2007 ; Zittoun et al., 2007.

La similarité du modèle avec ce qu'il représente soulève cependant une question délicate : faut-il considérer un "point de vue du savoir" ?

Dans la pratique de son analyse des connaissance acquises par les élèves, Tiberghien adopte bien le point de vue de l'élève, et non celui "du savoir" :

> *From the learning perspective, the analysis of student's activities is done by taking his/her point of view. One of our basic hypotheses is the learner's coherence : his/her activity in a situation is coherent from his/her point of view, this coherence can be based on aspects other than knowledge, for example the intent to get a good grade. For example, a student could propose an answer he thinks will get him a few points even though, for him the answer is incorrect. Another basic position is that the learner constructs a meaning of the situation and particularly of the knowledge involved (Tiberghien, 1996).*
>
> *(Tiberghien, 1997, p. 364)*

Dans cette recherche, je n'attribue pas de *point de vue* au savoir, réservant l'expression *point de vue* aux personnes : en effet, l'expression "point de vue du savoir" est métaphorique, le savoir" ne pouvant adopter de "point de vue" c'est bien plutôt le chercheur qui adopterait un "point de vue du savoir". Mais ne s'agit-il pas alors du point de vue du chercheur ? Oui, me diriez-vous, mais le chercheur peut justement adopter plusieurs points de vue successivement, "jouer" avec ces points de vue comme l'acteur "joue" des rôles pour prendre le point de vue d'un personnage : pour les comparer, les mettre en contraste, etc. On sent bien qu'il faut ici trouver une langage pour désigner ce "jeu des points de vue".

Je propose ici de reprendre ce que cette littérature désigne avec l'expression "le point de vue du savoir" comme un *référentiel*. En effet, le chercheur a besoin d'un point de référence concernant les savoirs en

jeu de manière à pouvoir expliciter à quoi il *rapporte*[80] les divers points de vue au cours de son analyse ou de sa théorisation. Or, il s'agit là d'un problème analogue à celui du physicien ou mathématicien qui s'intéresse, par exemple, au mouvement : il lui faudra un *référentiel inertiel* s'il veut utiliser le principe d'inertie. Je propose donc d'introduire un *référentiel épistémique* dès que l'on veut rapporter des points de vue à des savoirs génériques, qu'il s'agit de définir en particulier pour chaque situation, et d'utiliser à l'instar de ce que l'on fait en physique ou en mathématiques : une fois le référentiel défini, il suffit ensuite d'y faire référence avec une expression comme "par rapport aux savoirs", ou si l'on veut désigner plus précisément un pan précis du référentiel - selon le contenu de sa définition - avec une expression comme "selon le savoir enseigné", ou encore "selon le savoir à enseigner", en prenant ici "savoir enseignés" et "savoirs à enseigner" comme des parties définies de ce référentiel.

Enfin, au niveau épistémologique, l'introduction d'un *référentiel* permet de choisir la focale de la perspective à l'échelon de la *situation* : le *référentiel épistémique* fournit au chercheur un *modèle* des savoirs enseignés auquel il peut se référer pour analyser la *situation* dans son ensemble, *situation* au sein de laquelle il peut différencier les multiples points de vue des personnes impliquées.

2.3.1.5 Temps et durée dans les perspectives sur les conceptions

Poser la question du temps et de la durée revient à approfondir ce que les perspectives adoptées par les chercheurs permettent de théoriser concernant le déroulement de l'apprentissage. C'est en même temps reprendre le "débat insoluble" discuté précédemment, sous un autre aspect. En effet, les tenants des différentes positions dans ce débat divergent quant à la manière dont les apprentissages se succèdent au fil du temps : pour les uns, il y a un changement soudain et déterminant, le *changement conceptuel*[81], qui permet à l'élève d'acquérir le concept - ou au moins de franchir une étape - à un moment crucial du développement de ses connaissances, alors que pour les autres, il n'y a qu'un processus continu d'accumulation de fragments qui se structurent petit à petit.

Pour Tiberghien (2007), le processus d'acquisition de connaissances par les élèves est également représenté comme une accumulation de petits éléments, dans un ordre et une rationalité qui n'est pas (forcément) celle imaginée par l'enseignant lors de la dévolution des tâches aux élèves :

> *In particular we assume that students' conceptual understanding of physics is constructed through acquisition of small elements of knowledge but not in the rational order given by the discipline. (Tiberghien, 2007, p. 1)*

Les acquisitions des élèves ("students' knowledge") sont abordées comme de *petits éléments de savoirs*, que Tiberghien (2007) analyse avec la notion de *facettes* (voir aussi : Tiberghien & Malkoun, 2007).

80. Au sens d'une projection sur une droite ou un plan de référence, par exemple.

81. Cette théorisation fait écho aux travaux piagétiens sur le conflit cognitif où il pouvait montrer un passage entre raisonnement "non-conservant" et "conservant" chez les enfants ; la question de savoir si, et comment, ce que Piaget a pu établir pour la construction d'une forme logique de raisonnement *en général* - le stade opératoire - concernent l'acquisition de connaissances spécifiques par les élèves, mérite une discussion que je ne peux développer ici (voir p.ex. : Iannaccone & Perret-Clermont, 1993 ; Vergnaud, 1985).

Ces *facettes* constituent l'opérationnalisation méthodologique des petits éléments de savoir, avec une granularité de l'ordre de la phrase, permettant la construction par les chercheurs d'un catalogue comprenant ces petites facettes et de plus grandes facettes, correspondant à des concepts ou groupes procéduraux. A un niveau de granularité plus élevé, les facettes s'insèrent dans des *unités thématiques* (Tiberghien, 2007, p. 5).

Cette approche explicite l'articulation entre plusieurs échelons d'observation, et permet aux chercheurs de souligner l'importance des représentations symboliques dans l'apprentissage des sciences, intégrant à la démarche un échelon d'observation sensible à la médiation du sens à travers les signes, comme le défendait Vygotski :

> *All the hypothesis presented below are situated in a Vygotskian perspective ; we state that physics learning will not happen without teaching and that the mediation of adult and of sign as well is crucial for learning. (...) All these studies show that the evolution of students' knowledge and the development of taught knowledge during teaching are different.*
>
> *(Tiberghien, 2007, p. 3)*

Malgré un travail d'ingénierie didactique exemplaire, les séquences d'enseignement utilisées dans cette recherche ne font pas disparaître le phénomène de la difficulté de l'apprentissage de la physique sur certaines questions typiques de ces difficultés : seulement 29%-42% des élèves répondent correctement lors du questionnaire post-séquence sur une question connue pour induire chez les élèves une réponse comprenant la représentation d'une *force* dans la direction et le sens du mouvement - la *vis inertia* que Newton a ensuite abandonnée dans sa théorie [82]. Pourtant, l'analyse des *facettes* de la connaissance enseignée relève qu'il ne faut pourtant que deux ou trois facettes pour répondre correctement cette question (Tiberghien, 2007).

Tiberghien en conclut qu'il faut procéder à des analyses plus approfondies des *connaissances* mais aussi des *savoirs* eux-mêmes, en particulier de ce que sont les *savoirs de physique*, pour mieux comprendre ce que devraient être les *connaissances* acquises par les élèves :

> *We wonder why these simple statements, so often used in the classroom by the teacher and by the students, cannot be used by all the students to answer the questions. The answer cannot be based only on the facet analysis but needs a deeper analysis of physics, and students' knowledge.*
>
> *(Tiberghien, 1997, p. 15)*

82. Je reviendrai sur cette difficulté dans les analyses des situations de malentendu, p.ex. section 6.8.4.4 (p. 657), et à la section 8 (p. 709.

2.3.1.6 Du "débat insoluble" à la construction d'une nouvelle perspective

Introduction d'un *référentiel* pour dépasser l'opposition

Nous avons vu que le "débat insoluble" opposant la théorisation de l'apprentissage comme le changement de la conception individuelle et cohérente d'un élève et comme l'acquisition de connaissances/savoirs fragmentées se structurant progressivement, repose sur le croisement *sans coordination* de perspectives qui ne se focalisent pas sur le(s) même(s) échelon(s) d'observation du phénomène d'apprentissage, et qu'ils disposent de postulats théoriques ou philosophiques partiellement incompatibles qui justifient ces focalisations. Nous avons vu aussi que certains échelons sont rarement abordés pour étudier l'apprentissage des sciences, et pourraient constituer des taches aveugles de la recherche dans ce domaine, notamment :

— les *médiations sémiotiques* singulières qu'effectuent les élèves et les enseignants dans leurs activités de didactique des sciences ;

— les divers *points de vue* des enseignants et élèves et la question de leurs coordination, par rapport au *référentiel épistémique* (qu'il soit défini en référence aux savoirs à enseigner, aux savoirs enseignés ou encore à d'autres types de savoirs) ;

— les *situations* elles-mêmes, et les processus qui participent à leur construction, à l'interface entre l'individuel, le relationnel, l'institutionnel et le cours d'une histoire singulière.

Dans la littérature sur le *changement conceptuel* ou en psychologie cognitive, la signification des termes ou des signes utilisés est rarement discutée(pour une exception, voir Dykstra et al., 1992), et encore moins observée à travers une théorisation et une méthodologie permettant de saisir le sens différent que peut prendre un terme ou un signe selon les points de vue. Tiberghien discute ce problème de *granularité* dans les recherches sur le *changement conceptuel* et relève que les significations sont presque toujours abordées de manière abstraite, sans en discuter l'interprétation singulière des élèves en référence à des situations particulières : "They are at the level of principles and not detailed as interpretations of specific situations." (Tiberghien, 1997, p. 362).

Tiberghien (1997) met en évidence, dans le passage cité ci-dessus, un élément qui permet une avancée importante à ce que nous avons appelé un "débat insoluble" : adopter le point de vue de l'élève lors de ses analyses met le chercheur en tension entre, d'une part, utiliser un principe de cohérence permettant de combler les implicites ou autres éléments des connaissances que l'élève n'a pas exprimés, et d'autre part reconnaître que cette cohérence peut répondre à des finalités diverses, qui ne s'alignent pas forcément sur la définition des savoirs à enseigner ou savoirs de référence. Faut-il considérer que les élèves n'apprennent rien s'ils n'apprennent pas très exactement à exprimer ce qui, du point de vue de l'expert, fait office d'indices aux conceptions correctes en science ? Cette première question en soulève immédiatement une autre : que faire d'une réponse d'élève correspondant aux savoirs à enseigner mais à laquelle l'élève lui-même ne croit pas ? La normativité de la *situation didactique* (Brousseau, 1998/2004) induit une grande complexité, qui exige quelques clarifications de ce principe de cohérence, d'autant plus qu'il est utilisé à la fois pour

constituer des indices des connaissances des élèves à partir de leurs conduites ou discours, et pour leur attribuer, en retour, quelques "connaissances/savoirs" ou conceptions formatées selon les modèles experts. Il nous faut ici des critères plus précis, permettant de distinguer la cohérence des individus avec leur propre pensée, sur quelle durée, à quel moment, de la question de l'articulation entre *connaissances* et *savoirs*.

En conséquence, nous considérons[83] que l'attribution des conceptions des élèves à un principe de cohérence uniquement relativement aux *savoirs enseignés* ou *savoirs à enseigner* n'est pas viable, en ce qu'elle surestime la cohérence interne de la pensée en construction. En effet, la littérature a montré depuis longtemps les contradictions dans lesquelles notre cognition peut être engagée sans pour autant que nous nous en rendions compte.

Le problème de cette cohérence ne tient pas seulement à la surestimation d'une pensée en construction, qui se cherche encore, mais aussi au fait de n'utiliser que les *savoirs à enseigner* - c'est-à-dire l'intentionnalité des enseignants ou des chercheurs - pour point de référence. Il y a là une surestimation de *l'orientation* ou *alignement* des connaissances construites par les apprenants sur la *direction* définie par les experts. En effet, la cohérence de la pensée des individus ne saurait être surestimée *sur le plan psychologique* : au cours du processus de construction de ses connaissances, l'individu est cohérent avec ses propres pensées. Nier cela n'est pas seulement problématique sur le plan théorique, c'est également un travers social et moral, c'est le raisonnement lapidaire et simpliste qui conduit si facilement l'expert à accidentellement considérer l'apprenant comme "un idiot", du fait qu'il n'a pas *encore* acquis toutes les *connaissances* dont dispose (individuellement) l'expert à un moment donné. Il faut donc distinguer la cohérence de la pensée de l'apprenant en référence aux *savoirs enseignés* ou aux *savoirs à enseigner*, qui détermine une direction bien précise qui n'est pas forcément celle que prend la pensée de l'apprenant, et la cohérence de la pensée de l'individu, en référence à ses propres *connaissances* ou à son propre processus de construction de ces *connaissances*. Cette seconde cohérence ne saurait être surestimée : elle constitue le fondement même de la vie intellectuelle humaine. Moyennant l'introduction d'un double référentiel[84], celui des *savoirs enseignés* et *savoirs à enseigner* et celui des (processus de construction de) *connaissances*, le débat qui oppose tenants des conceptions cohérentes et tenants de connaissances/savoirs fragmentaires peut être résolu.

Des pistes pour une nouvelle perspective

La démarche de ces recherches permet de mettre en évidence des liens détaillés entre savoirs à enseigner, savoirs enseignés et connaissances des élèves. Le niveau d'observation adopté est celui des *relations* entre les connaissances/savoirs distribuées à divers échelons et distribuées entre les points de vue. Ces travaux mettent en évidence le rôle important de la communication dans l'apprentissage, par exemple dans une recherche sur l'apprentissage de la modélisation (Brna, Baker, Stenning, & Tiberghien, 2002), et m'ont donné l'espoir qu'une perspective centrée sur les *situations de malentendu*, intégrant l'observation de la

83. En accord avec Tiberghien, puisqu'elle souligne les différents types de rationalités auxquels peut répondre cette cohérence.

84. Comme en physique...

communication à celle de la pensée, pouvait amener un nouvel éclairage sur la question de l'apprentissage des sciences de la nature.

Nous disposons déjà de plusieurs précisions permettant d'esquisser une nouvelle perspective, par rapport à l'état du débat insoluble mentionné au début de cette problématique :

— la prise en compte des points de vue qui conduit à distinguer connaissances acquises par les élèves, savoirs enseignés et savoirs à enseigner, mais aussi à aborder les processus de médiation du sens par l'intermédiaire des signes et de leurs usages (une sémiologie) ;

— la focalisation sur les échelons relationnel et situationnel dont les travaux en didactique des sciences met en évidence la pertinence pour comprendre les processus d'enseignement et d'apprentissage ;

— la focalisation sur des processus en cours, plutôt que sur des prises de vue instantanée.

L'orientation esquissée par ces éléments rappelle le projet d'investigation scientifique des *cheminements de pensée* (Inhelder et al., 1992), sous l'impulsion de Bärbel Inhleder qui part des travaux de l'épistémologie génétique pour concevoir des recherches sur la singularité des processus mis en œuvre par les sujets psychologiques dans des situations particulières. En gardant d'une part l'épistémologie génétique à portée de main pour répondre au besoin, soulevé ci-dessus, de mieux comprendre la nature de *la connaissance* en jeu, que ce soit *les connaissances* que construisent les élèves ou *les savoirs* dont l'école organise la transmission, et d'autre part en s'intéressant à des processus singuliers et situés[85], cette démarche me semble offrir les meilleures chances d'une éventuelle avancée sur la question des difficultés de l'apprentissage des sciences pour les élèves qu'ont soulevées les travaux sur les conceptions.

Avant d'exposer, à la section 2.3, quelques éléments spécifiant la perspective et les échelons d'observation choisis pour cette recherche, et de présenter, au chapitre 3, le cadre théorique permettant de définir les *situations de malentendu*, je reviens sur le "débat insoluble" discuté dans ce chapitre pour proposer une conclusion (provisoire).

2.3.2 Une nouvelle perspective

2.3.2.1 Introduction

Du bref examen de la littérature effectué en amont, il ressort que c'est surtout l'échelon individuel qui a été étudié pour tenter de théoriser l'apprentissage des sciences. Au niveau théorique, un problème de discontinuité entre ces échelons apparaît : on parvient difficilement à expliquer comment l'apprenant semble à la fois se reposer sur des conceptions personnelles résistantes au changement - les *conceptions* citées par une majorité des recherches - alors que ces conceptions individuelles n'apparaissent pas tellement cohérentes dans les recherches s'intéressant à l'usage de petits éléments de savoirs. Ces recherches centrées sur le processus de construction des connaissances par les élèves fournissent des résultats plutôt en faveur

85. L'adjectif *situé* est utilisé ici délibérément pour désigner la *situation* dans l'espace (social, culturel, sémiotique, etc.) et dans le temps.

de connaissances/savoirs fragmentées, qui ne constituent pas d'emblée une conception cohérente chez l'apprenant. Nous avons vu que ce problème de cohérence ne porte pas tellement sur le couple question-réponse utilisé dans les recherches ou en classe, car la stabilité des réponses obtenues dans les recherches pour des questions spécifiques est largement reconnue et a justement conduit de nombreux chercheurs à faire l'hypothèse de *conceptions* antérieures à l'instruction scolaire. C'est plutôt l'analyse des réponses données par un même élève à des questions différentes qui conduit à remettre en question la cohérence de conceptions individuelles : des questions qui devraient interpeller la même conception chez les élèves, par rapport au référentiel épistémique, n'obtiennent souvent pas des élèves des réponses qui "vont ensemble" du point de vue de l'expert.

J'ai proposé une solution à ce débat en deux volets, d'une part sous la forme d'une prise en compte plus systématique des points de vue et d'un référentiel épistémique, et d'autre part sous la forme d'une articulation entre échelons d'observation différents sur une même échelle :

— ce qui paraît cohérent du point de vue des experts - ou en rapport à un référentiel épistémique - ne l'est pas forcément du point de vue de l'élève ou de l'individu qui construit ses connaissances : ainsi, le constat de connaissances/savoirs fragmentées n'est pas une remise en question de la cohérence individuelle des personnes engagées dans un processus de construction de connaissances, mais plutôt un problème de coordination de points de vue différents sur le même objet ;

— ce qui peut paraître cohérent à un échelon d'observation peut paraître fragmenté à un autre : en précisant les échelons sur lesquels les recherches se focalisent, une partie du problème théorique pourrait être résolu ou, au moins, faire avancer le débat.

La prise en compte différenciée des points de vue de tous les acteurs impliqués, et d'un référentiel épistémique clairement défini, permettra de s'intéresser, dans notre recherche, aux connaissances construites par les élèves sans devoir systématiquement les assimiler aux savoirs définis par les experts : nous ne présumerons donc pas que les connaissances que construisent les individus s'alignent forcément dans l'orientation qu'ont pris les savoirs disciplinaires de la physique au cours de l'histoire des idées scientifiques. Cela devrait nous permettre d'éviter la fréquente confusion entre des savoirs de différents ordres définis par des experts, et des connaissances construites ou appropriées par des élèves ou participants aux recherches. J'espère ainsi également minimiser une tache aveugle actuelle des recherches sur l'apprentissage des sciences, et me donner les moyens d'observer les connaissances que les élèves construisent *qui ne sont pas considérées comme des savoirs à enseigner*. Ces connaissances échappent le plus souvent aux perspectives choisies des recherches de psychologie parce qu'elle n'ont justement pas été retenues par les chercheurs dans la focale qu'ils ont choisis pour construire leur perspective.

La prise en compte de divers échelons est plus complexe. Elle permet, dans un premier temps, de montrer que le débat n'est peut-être pas insoluble après tout, à condition de coordonner les perspectives théoriques adoptées par les chercheurs, et de considérer le problème théorique rappelé ci-dessus comme un problème de discontinuité entre des échelons d'observation du même phénomène. Ces problèmes de dis-

continuités existent dans les sciences de la nature : en physique, par exemple, des phénomènes apparaissent à l'échelon supra-atomique qui ne s'expliquent pas à l'échelon sub-atomique [86]. Dans le débat qui nous occupe, la cohérence et stabilité du phénomène des conceptions semble disparaître lorsque cette cohérence est considérée (1) au cours du temps, par exemple en focalisant les analyses sur des processus, et (2) à travers différentes questions portant sur les mêmes savoirs *du point de vue expert*.

Cette recherche se focalise sur les *situations de malentendu* dans le but d'évaluer une hypothèse explicative de cette discontinuité entre les observations effectuées à différents niveaux :

> *la cohérence et la stabilité du phénomène des conceptions s'explique à l'échelon de la situation, au sens où le chercheur peut en décrire la genèse relativement aux processus de communication, aux contraintes de la tâche et en particulier de la consigne, de telle sorte qu'attribuer des conceptions aux individus devienne superflu.*

Je tenterai d'examiner cette hypothèse dans un raisonnement *per absurdum* : si les erreurs des élèves se rapportent plutôt à la situation de malentendu que j'aurai analysée en fonction de la consigne, des attentes concernant la réponse à fournir, etc., qu'à des connaissances individuelles de la physique manquantes chez les élèves par rapport au *référentiel épistémique*, j'aurai montré que cette hypothèse est vraisemblable et fournit une explication alternative à celles du débat cité en amont.

En effet, cette hypothèse permettrait de montrer à la fois la cohérence de l'échelon situationnel, en considérant que la stabilité du couple dialogique question-réponse que relève les travaux sur les "conceptions" est un phénomène qui repose au moins autant sur les particularités des questions posées que sur d'éventuelles connaissances en sciences des élèves eux-mêmes, et que l'éventuelle "fragmentation", par rapport au référentiel épistémique, des connaissances/savoirs observés par les chercheurs procède autant de la manière d'enseigner que par la manière de penser des élèves. Si cette hypothèse résiste aux observations, elle permet de considérer les élèves cohérents *avec eux-mêmes* au cours du processus de construction de leur point de vue (un autre échelon), grâce au fait que leurs points vue singuliers ne sont pas d'emblée assimilés par le chercheur à des positions prédéfinies d'un point de vue expert [87], mais peuvent prendre des chemins inattendus qui restent à décrire.

La prise en compte explicite de divers échelons permet, en outre, d'identifier des continuités ou discontinuités entre les échelons, en se focalisant délibérément sur des échelons d'observation rarement abordés, comme l'échelon sub-individuel des "éléments de savoir" [88] en didactique des sciences, ou l'échelon du *sens*

86. L'analogie avec les sciences naturelles est particulièrement parlante pour ce problème, puisque la cellule, par exemple, est traitée à un échelon des observations de biologie comme un organisme *cohérent*, alors qu'à un échelon plus détaillé elle comprend de nombreuses substances, organes et autres "fragments".

87. Autrement dit, l'observateur accepte que ces points de vue singuliers des élèves puissent prendre une autre orientation que les savoirs définis du point de vue expert : ils n'apparaissent alors peut-être pas "cohérents" du point de vue expert, mais le chercheur est néanmoins tenu d'en rendre compte à partir d'une cohérence "interne" au point de vue considéré, c'est-à-dire une cohérence à l'échelon individuel d'une construction de sens par l'élève, plutôt qu'à l'échelon relationnel de la transmission des savoirs qui évaluerait la relation entre connaissance d'un élève et savoir à enseigner.

88. Je ne fais délibérément pas référence à une nomenclature spécifique ici, car j'adopterai le concept de "classe-objet" de Grize (1996) pour cette recherche, pour des raisons que j'explicite plus loin, mais l'échelon d'observation cité est celui que

et de la *signification* ("meaning") en psychologie culturelle. Tiberghien (2008) fournit un exemple de ce type de tache aveugle : elle discute des travaux de l'approche culturelle qui se focalise sur la construction du sens et les significations dans l'apprentissage de la physique, mais qui ne relie pas cet échelon à l'apprentissage des élèves à l'échelon individuel [89]. Or, le défi de la théorisation consiste à tenter de montrer, lorsque c'est nécessaire, que des observations peuvent parfois expliquer l'apparition d'un phénomène à un autre échelon [90].

2.3.2.2 Différenciation épistémique : perspective, savoir et connaissance

Avant de définir ma perspective, je présente dans cette section aussi brièvement que possible, les concepts dont je ferai usage concernant les connaissances/savoir ("knowledge"), et sans lesquelles il me paraît impossible de clarifier mes propos. Je vais différencier les cinq termes suivants :

— *l'information*, compte tenu de l'importance qu'a pris ce concept en sciences cognitives, que je n'utiliserai pas mais dont je veux montrer justement en quoi il est important de le distinguer des autres concepts utilisés ;

— *les connaissances* acquises par des personnes au cours de leur vie ;

— *les savoirs* comme les savoirs disciplinaires, ceux que l'on enseigne, etc ;

— *la connaissance*, au sens général d'une possibilité de l'évolution humaine, c'est-à-dire au sens où Piaget utilise ce terme au singulier.

Pour définir ces concepts, je reprends ici la distinction entre *information*, *connaissance* et *savoir* proposée par Astolfi (1992) (pour s'y référer par la suite, voir le glossaire, annexe D, p. 793).

> *Quelles sont d'abord les caractéristiques de l'information ? On peut proposer les trois éléments suivants :*

proposait déjà Vygotski ("word-meaning") dans sa discussion de l'unité d'analyse de *Pensée et Langage*, ou Bruner (1991a) dans la révolution cognitive qu'il appelait à centrer justement sur la construction du sens et les médiations symboliques. Dans la recherche sur l'apprentissage des sciences, les *facettes* de Tiberghien et Malkoun (2007) sont un exemple de cet échelon d'observation qui permet de voir autre chose que l'échelon individuel, et soulève de nouvelles questions. Néanmoins, les travaux qui cherchent à observer les significations, leur déplacement, et leur transformation à l'échelon sub-individuel sont encore peu nombreux et constituent un nouveau champ de recherche, basé notamment sur la distinction entre *sens* et *signification*, qui nous vient de Vygotski (pour les implications de cette distinction en milieu scolaire, voir par exemple : Zittoun, 2013).

89. Plusieurs chercheurs de ce courant ont également indiqué un manque d'outils d'analyse permettant d'aborder la signification ("meaning") de manière à articuler langage et cognitif, par exemple Jaan Valsiner et Kenneth Cabell lors du 3ème Seminaire International de Psychologie Culturelle, 10-13 mars 2014, à Itacimirim, Camaçari, Bahia, Brésil.

90. Et cela malgré l'argument de Bruner (1991a) à ce propos, considérant que c'est une erreur de vouloir expliquer un phénomène en se référant à un autre niveau. Les exemples de telles explications en sciences sont non seulement nombreux, mais sont aussi les plus grands succès de la démarche scientifique. Je pense que Bruner a considéré la *démarche* stérile alors que c'est sa *mise en œuvre*, dans le courant cognitiviste qu'il discute, qui n'est pas convaincante. Autrement dit, ce n'est pas d'expliquer un phénomène observé à un échelon par des observations à un autre échelon qui pose problème dans l'approche cognitiviste que Bruner critique, mais c'est le choix des échelons d'observation et les liens qui sont - ou ne sont pas - tirés entre eux qui sont peu convaincant sur le plan théorique. Sur ce point, je me rallie non seulement à la critique de Bruner, mais considère même que ma proposition d'échelle constitue un prolongement de cette critique car, à mon avis, la révolution cognitive n'est pas encore accomplie... La pratique scientifique exige d'*essayer* ces échelons pour arriver à la moindre conclusion sur leur productivité théorique et efficacité explicative. Il paraît dès lors normal qu'un changement radical comme celui que propose Bruner, à savoir la nécessité de réhabiliter la signification en tant que niveau d'observation des phénomènes de la psychologie, prenne forme sur plusieurs décennies, dans le meilleur des cas.

> — *l'information est extérieure au sujet qui en dispose ou qui en prend connaissance ;*
>
> — *elle est stockable et quantifiable, sous des formes diversifiées, qu'il s'agisse des rayons d'une bibliothèque ou des fichiers d'une disquette ;*
>
> — *elle dispose d'une mise en forme qui rend possible sa circulation, voire sa transaction marchande.*
>
> *(Astolfi, 1992, pp. 67-68)*

L'*information* désigne selon cette définition un référent matériel (elle est "extérieure au sujet"), qu'il soit biologique comme dans les gènes des êtres vivants[91], électronique comme dans les machines, physique ou autre. J'adopte ce concept d'autant plus facilement qu'il me paraît cohérence avec la critique de Weil-Barais (1993) de la *théorie du traitement de l'information* (voir plus haut), critique qui permet de montrer que la théorie en question s'intéresse à autre chose qu'à l'apprentissage, en tout cas à l'apprentissage tel qu'il prend place dans un milieu scolaire. À la suite de l'intermède épistémologique ci-dessus, j'ajouterai qu'il y a de nombreux échelons entre l'*information* et le *sens* que l'élève donne à ses activités, aux connaissances qu'il construit, sans la considération et l'étude desquelles le processus *apprentissage* demeure tout simplement inintelligible[92]. La distinction suviante d'Astolfi, entre *connaissance* et *savoir*, est presque toujours reprises par les travaux francophones en didactique des sciences :

> *Autant l'information se caractérise par sa position d'extériorité par rapport aux catégories mentales de la personne qui l'appréhende, autant la connaissance apparaît consubstantielle à l'individu et à son histoire :*
>
> — *la connaissance est le résultat intériorisé de l'expérience individuelle de chacun ;*
>
> — *elle reste globalement intransmissible dans la mesure où il n'existe pas de langage possible pour en exprimer la globalité ;*
>
> — *elle reste du coup inintelligible pour autrui, tout au moins de façon directe et complète. Seuls des éléments partiels peuvent en être inférés avec prudence.*
>
> *(Astolfi, 1992, pp. 68-69)*

La dimension privée (et inobservable) des *connaissances* sur laquelle insiste Astolfi est très importante : les traces verbales laissées sur un questionnaire ne *sont* pas les *connaissances* de l'élève, mais uniquement sa réponse à la question. Cette confusion étant largement répandue dans le milieu scolaire, j'accorderai

91. Par exemple, on comptera comme *information* le fait pour la salamandre de refléter certaines longueurs d'onde lorsque sa peau est éclairée par les rayons du Soleil, mais la couleur *jaune*, elle, dépend déjà de mon système perceptifs et d'une connaissance catégorielle qui peuvent varier d'un individu (pour plus de détail sur les informations externes au sujet humain et sa perception des couleurs, voir : Giere, 2006).

92. Au sens proposé par Astolfi, l'*information* qui me concerne dans l'analyse des discours dans cette recherche, est surtout une information que j'aborderai plutôt en sémiologie à l'aide du concept *signifiant*.

beaucoup d'importance à éviter tout raccourci de langage pouvant prêter à confusion d'une manière semblable, dans cette recherche.

Concernant le *savoir*, Astolfi fournit une définition que je reprends un peu plus dans le détail ici, pour en proposer une légère modification :

> *Par opposition à l'information dont on a montré le caractère d'objectivité extérieure à l'individu, et à la connaissance syncrétiquement liée à l'histoire de chaque personne, le savoir résulte d'un effort important d'objectivation. Cela signifie qu'un savoir est toujours le fruit d'un processus de construction intellectuelle et que, pour y parvenir, l'individu doit élaborer un cadre théorique, un modèle, une formalisation.*
>
> *(...)*
>
> *Ce qui caractérise un savoir peut alors s'exprimer de la façon suivante :*
>
> — *le savoir est construit par le sujet, à travers l'élaboration et l'usage d'une formalisation théorique ;*
>
> — *il ne peut expliciter qu'une partie de la connaissance du sujet, celle qui bénéficie de l'élaboration d'un langage approprié, dans le cadre qui a été problématisé ;*
>
> — *il permet de poser de nouvelles questions qui n'avaient pas cours avant lui, et contribuent à "lire" de façon nouvelle la "réalité" empirique.*
>
> *Le mot "savoir" est issu du latin* sapere *: avoir de la saveur. On peut donc dire, sans excès, qu'un savoir, c'est ce qui est susceptible de donner un goût nouveau au réel qui nous entoure. Il n'est placé, lui, ni sous le primat de l'objectivité, ni sous celui de la subjectivité, mais plutôt sous le primat de I'objectivation.*
>
> *(Astolfi, 1992, pp. 69-72)*

Dans cet extrait, Astolfi s'inquiète de la manière dont le savoir - une fois constitué - est approprié par le sujet. Dans cette recherche, ce problème constitue justement l'objet d'étude auquel je m'intéresse : il serait dès lors inconvenant de placer dans une définition quoique ce soit en référence à ce processus, dont j'attends de la recherche empirique de me renseigner davantage. Autrement dit, plutôt que de poser la question de l'appropriation par un individu des savoirs, je laisse cette question à un autre échelon, celui des relations entre *connaissances* des élèves, *savoirs enseignés* et *savoirs à enseigner*. Pour le reste, la définition d'Astolfi est non seulement cohérente avec la problématisation et l'épistémologie présentées, mais elle apporte en plus le lien entre objectivité et subjectivité en référence à l'objectivation [93] : ce processus d'objectivation m'intéresse tout particulièrement, pour le fait que je ne sais pas grand chose sur la manière dont "ça se passe" au cours des activités de didactique des sciences. Dès lors, pour ces raisons, je propose un amendement à la définition de savoir d'Astolfi : plutôt que de considérer les *savoirs* "construit par le sujet" je les considérerai, en attendant d'en découvrir plus précisément le fonctionnement, qu'ils sont "construits dans la *communication* [94] ", et je réserve le concept de *connaissance* pour parler de ce que les

93. Astolfi (1992) cite Popper à cet égard.

94. L'idée est principalement de considérer ici que les *savoirs* sont toujours "collectifs", au sens où ils contiennent toujours plusieurs *voix* (voir plus loin, p.ex. section 3.2.9, p. 144), et au sens où les *savoirs scientifiques* ont toujours pour origines des dialogues et des débats (voir plus loin, p.ex. section 3.2.12, p. 155), situés historiquement, qui les constituent au fil d'une tradition de pensée.

élèves construisent, s'approprient de ces *savoirs*. Cela évitera de distinguer, pour un même élève, entre ce qui serait ses *connaissances* et ce qui serait ses *savoirs*, et donnent aux *savoirs* les autres caractéristiques sur lesquelles Astolfi insiste : ils procèdent d'une "socialisation", dispose d'un "cadre théorique" - d'une perspective - et sont élaborés au cours d'un processus de problématisation. Moyennant cet amendement à la définition d'Astolfi, elle fonctionne bien pour les distinctions plus fines entre *savoirs enseignés*, *savoirs à enseigner* introduite par Tiberghien (1997) et discutées plus haut.

En outre, le concept d'Astolfi nous rend attentif au rôle d'intermédiaire de ces *savoirs*, entre *subjectivité* et *objectivité*, ce qui est particulièrement important pour le problème de l'apprentissage de *savoirs scientifiques*, justement.

À ces distinctions d'Astolfi, je reprends le terme piagétien *la connaissance*, au singulier et précédé de l'article défini, pour signifier la possibilité de connaître de l'être humain en général, la fonction biologique de l'espèce à laquelle Piaget fait très spécifiquement référence dans certains travaux (p.ex. : Piaget, 1967/1992). Ce concept abstrait et très général me paraît utile à la discussion épistémologique.

En plus de ces distinctions, j'ajoute ici quelques notions dont je fais usage pour mettre en œuvre une épistémologie perspectiviste dans cette recherche ; le but de ces notions est essentiellement de pouvoir qualifier quelques aspects de ce qui spécifie une perspective par rapport à une autre. En effet, en cohérence avec mon postulat perspectiviste (voir : Giere, 2006), la perspective elle-même est une forme de connaissance, dont mes premiers travaux de description (Kohler, 2018) permettent de dégager des aspects distincts. Je m'y réfère pour la description de ces éléments à l'aide des notions suivantes :

la position ou *le point où l'on se trouve* est le lieu d'où se tient l'observateur quand il construit sa perspective ou quand il l'adopte[95], ce qui a évidemment beaucoup à voir, pour une perspective scientifique, avec la posture de chercheur, l'histoire des sciences ayant conduit à proposer cette perspective, etc. ;

la focale désigne ce qui est inclus dans la perspective, de la définition de l'objet d'étude au choix de l'échelon ou des échelons de l'observation ;

l'orientation et le sens sont évidemment fonction de la *focale*, d'une part, et de sa *position*, d'autre part, mais ils peuvent aussi être discutés en tant que tels et expriment les finalités de la perspective, ce que l'on cherche à voir ou à montrer ;

la coloration permet de rendre compte des filtres éventuels que la perspective met entre le phénomène ou l'objet étudié et l'observateur, que ce soit une absence de jugement de valeur et de réaction

95. En effet, adopter une perspective s'approche parfois du *jeu de rôle* au sens où celui qui adopte la perspective change de *position* parfois temporairement, justement pour pouvoir adopter cette perspective ; un reporter adoptant la perspective journalistique sur un événement va jouer le reporter, quelles que soient ses émotions et ses avis personnels quant aux événements qu'il filme, relate, transmet d'une certaine manière. Un élève peut adopter une perspective scientifique sur un phénomène, une question, en jouant le rôle du scientifique : lorsqu'il retourne à la maison après l'école, il aura probablement abandonné cette perspective sur le reste des événements de la journée, et sinon il risque de rencontrer quelques problèmes... Ainsi, la *position* peut être une *position* temporaire que l'on prend volontairement pour un temps déterminé, pour laquelle on se déplace comme le photographe se déplace pour prendre une image qui correspond mieux à ses objectifs.

émotionnelle pour une perspective scientifique par exemple, ou une *coloration* critique relative à des critères, une *coloration* poétique ou autre chose encore dont on peut dire qu'elle met en évidence, déforme ou transforme ce que la perspective perçoit de son objet par une coloration spécifique [96].

La figure 2.1 (ci-dessous) présente ces différents aspects dans une métaphore graphique inspirée de la photographie - celle de l'observation d'un cristal de roche - dans le but de fournir une référence imagée au lecteur, en attendant une théorie.

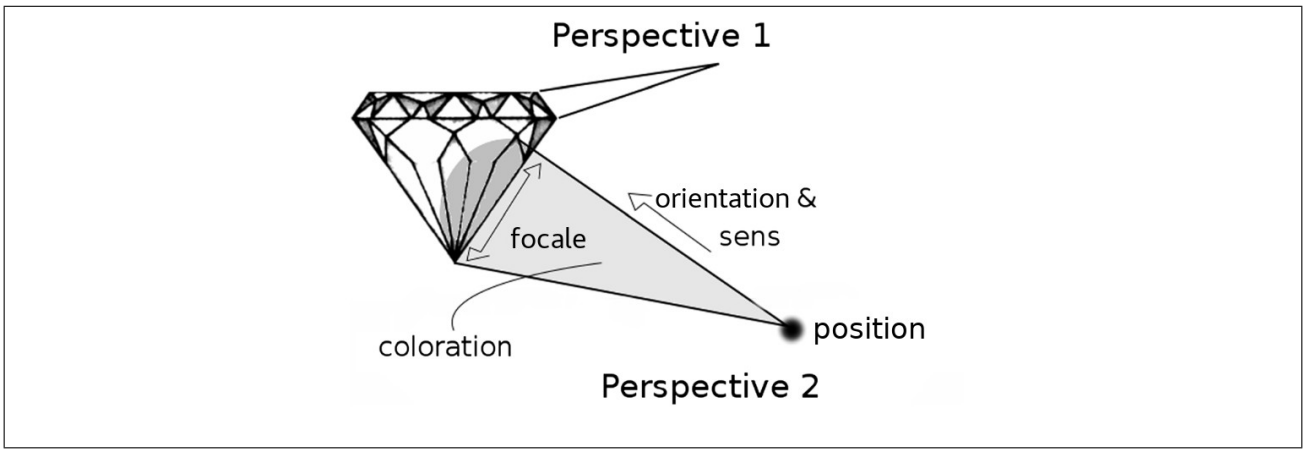


FIGURE 2.1 – Métaphore graphique de deux perspectives, extrait de Kohler, 2018, p. 107.

Ces spécifications relatives à une perspective me servent surtout à expliciter plus clairement les choix effectués pour ma perspective dans cette recherche, en particulier la question du choix de la *focale*, dont ce chapitre dans son ensemble vise à montrer l'importance.

2.3.2.3 Le choix de la focale : les échelons à observer

En vue de la constitution d'un cadre théorique pour aborder l'apprentissage des sciences à travers les situations de malentendu, présenté au chapitre suivant, je vais à présent définir les échelons sur lesquels focaliser ma perspective théorique. La question qu'il nous faut décider est celle-ci : *sur quel(s) échelon(s) d'observation faut-il focaliser notre perspective théorique, compte tenu de l'état de la littérature sur l'apprentissage des sciences, pour maximiser nos chances de contribuer à la théorisation du phénomène des conceptions*[97] *par cette recherche ?*

La problématisation brièvement présentée ci-dessus me motive à tenter une explication à travers la notion de *malentendu*. Dès lors, la question s'opérationnalise de cette manière : *sur quel(s) échelon(s) d'observation faut-il focaliser notre perspective théorique pour aborder l'apprentissage des sciences à travers d'éventuels malentendus ?*

96. Le concept d'*éclairage* de Grize a inspiré cette idée de *coloration* et désigne, chez Grize (1996), les valeurs émotionnelles, morales, etc. d'une schématisation.

97. J'utilise cette expression par commodité, pour désigner les difficultés que rencontrent les élèves à s'approprier les savoirs à enseigner en sciences par la manière dont ces difficultés sont répertoriées dans la littérature - sous forme de *conceptions* - alors que, justement, la question de savoir s'il s'agit de conceptions et/ou d'autre(s) chose(s) est ouverte.

La discussion des échelons présentées ci-dessous a surtout pour objectif de préparer la recherche empirique à se focaliser aussi et surtout sur les taches aveugles que je viens de citer. À cette fin, je discuterai les échelons suivants :

— un échelon sub-individuel permettant de décrire des points de vue singulier et situés à un moment particulier, qui se focalise sur le *sens* que prennent des signes, conduites et éléments du contexte matériel, social, culturel et historique *selon ces points de vue* ;

— un échelon centré sur les *processus* de construction des points de vue, et leur transformation au cours du temps ;

— un échelon supra-individuel permettant d'investiguer la coordinations des points de vue entre eux, la mise en contraste ou la comparaison ;

— un échelon situationnel où peuvent être décrits ou définis des éléments qui fonctionnent comme des références aux autres niveaux, par exemple un *référentiel épistémique* permettant de disposer d'une référence quant aux savoirs de physique, ou encore le *contrat de communication* (Rommetveit, 1976) ou *contrat didactique* (pour une définition du concept, voir p.ex. : Margolinas, 1997).

2.3.2.4 Décrire des points de vue singuliers : la question du *sens*

Avec la question des malentendus, nous nous focalisons sur le sens que donnent les individus aux *éléments de savoirs* - tels que les nomme la didactique des sciences - c'est-à-dire à l'appropriation par les élèves des savoirs enseignés [98], au cours d'un processus d'apprentissage qui ne peut se théoriser aussi simplement qu'une transmission d'informations : les élèves interprètent et transforment les savoirs au cours de ce processus, pour les reconstruire [99]. Par ailleurs, ces éléments de savoir ne se donnent pas d'emblée comme des propriétés d'individus [100] mais sont *assimilés* et *accommodés* (selon la théorie piagétienne) ou *interiorisés* (selon le terme de Vygotski) à partir du milieu physique, social et culturel. En termes d'échelon, il est par conséquent nécessaire d'observer, premièrement, un échelon sub-individuel à hauteur des significations, pour décrire la manière dont ces éléments de savoir circulent, s'échangent et se transforment, en particulier au cours des interactions symboliques mais également à travers l'usage d'*objets de savoir* (Malkoun & Tiberghien, 2008) et de procédures.

Néanmoins, cet échelon sub-individuel est particulièrement difficile au niveau méthodologique : comment peut-on reconstruire le sens que donnent des personnes à des savoirs enseignés au fil de processus continus ?

98. Inhelder et de Caprona (1992) parlent d'une *individuation des connaissances* (p. 44).
99. Je proposerai au chapitre suivant un modèle de la communication cohérent avec cette idée.
100. Voir à ce sujet la critique des approches cognitiviste de (Bruner, 1991a), qui concerne largement la littérature s'intéressant au *changement conceptuel* et aux *conceptions*, des deux côtés du débat, et en particulier des théories se référant à ces éléments de savoirs comme directement liés à la perception (diSessa, 1993b ; McCloskey, 1983) ou à des structures cognitives individuelles et innées (Carey, 1985, 2009), qui n'ont (toujours) pas adopté une position interactionniste permettant d'expliquer par des processus *génétiques* (au sens de Piaget, c'est-à-dire de construction en interaction avec le milieu) la continuité du développement, ce que Piaget (1957) a pourtant argumenté de manière convaincante il y a longtemps déjà.

2.3.2.5 Décrire des points de vue en construction et en transformation : la question de *l'argumentation*

Une démarche praticable connue [101] consiste à aborder le *sens* que prennent les activités, les objets et les ressources symboliques pour les élèves au fil de la construction des connaissances à leur sujet : la *microgenèse* [102] située du *sens* selon les *divers points de vue*.

Si les bases méthodologiques de ce programme de recherche ont été posées il y a longtemps déjà par Inhelder et de Caprona (1992) [103], la mise en oeuvre d'une démarche microgénétique en milieu naturel d'enseignement sur des contenus qui font plus largement usage de ressources symboliques et langagière, comme c'est le cas pour la physique du baccalauréat dans cette recherche, nous oblige à enrichir cette démarche d'instruments théoriques permettant une observation de la construction des points de vue dans et par le langage. En effet, dans les recherches piagétiennes et néo-piagétiennes, les microgenèses présentent le plus souvent l'observation de la manipulation d'objets concrets, la résolution de problèmes où les ressources symboliques - et en particulier la construction d'un discours - ne constituent pas l'enjeu principal des tâches proposées. En outre, nous avons vu que l'élaboration des discours constituent l'une des taches aveugles fréquentes des recherches en sciences cognitives.

Les travaux dans le domaine de l'argumentation, par contre, permettent d'aborder cet échelon à l'interface du langage et du cognitif, en prolongeant l'approche piagétienne avec une dimension qui lui manquait : celle d'une logique naturelle de la construction des significations [104]. C'est un échelon d'observation permettant d'analyser le langage dans ses usages pour penser, comme *instrument* (pour une définition, voir p.ex. : Rabardel, 1995), mais aussi dans sa dimension sociale qui permet circulation des termes linguistiques d'une

101. Cette démarche issue du constructivisme piagétien a été reprise dans les travaux de psychologie socio-cognitive en prêtant attention aux singularités des situations sociales, matérielles et symboliques dans une diversité d'analyses microgénétiques (voir p.ex. : Inhelder et al., 1992 ; Larrain, 2016 ; Leutenegger, 2000 ; Schubauer-Leoni & Grossen, 1984 ; Schubauer-Leoni & Perret-Clermont, 1984, 1985/1991 ; Tartas, 2012 ; Tartas & Perret-Clermont, 2008 ; Tartas, Perret-Clermont, & Baucal, 2016 ; Wagoner, 2009 ; Wertsch, 2008 ; Zittoun & Iannaccone, 2014), croisant les apports de Vygotski à la psychologie néo-piagétienne et à la psychologie sociale. Pour une critique de la psychologie contemporaine sur ce point, et la mise en valeur de la solution piagétienne du constructivisme interactionniste (symbolique), voir par exemple Campos (2017) ; Jalley (2006).

102. Wagoner (2009) fait remonter ce terme à une publication de Heinz Werner en 1956, comme première occurrence en langue anglaise de "microgenesis". Il définit plus généralement la *microgenèse* comme une méthode de recherche permettant d'étudier un processus psychologique en donnant à voir son élaboration progressive par le sujet, par exemple chez Werner il s'agissait d'étudier le processus d'interprétation d'un stimulus visuel en soumettant les sujets à des stimuli de plus en plus clairs : les traces enregistrées au fil des diverses étapes permettant de mieux comprendre le processus. Dans l'usage que je fais ici de "microgenèse", je reprend à la tradition piagétienne le terme "genèse", ce qui le fait remonter à des travaux encore plus anciens (voir p.ex. : Piaget, 1945/1978), même si Piaget étudiait la genèse de connaissances pour un sujet épistémique, et que la sensibilité au milieu social de ces "genèse" n'a été théorisée que bien plus tard au moment où ces recherches se sont intéressées au sujets psychologique et au contexte singulier de ses constructions de connaissances (voir les travaux cités ci-dessus). Ainsi, *microgenèse* fait ici référence à l'étude d'un processus à travers sa progressive mise en place (la *construction*) *en interaction avec le milieu* et à un échelon "micro", c'est-à-dire sur des intervalles temporels courts (de quelques secondes à quelques heures), qui se distinguent des intervalles longs (quelques mois à plusieurs années) étudiés en psychologie du développement.

103. Je préfère *processus* à *procédure*, que je considère une concession des auteurs au cognitivisme ambiant, faite au détriment d'une approche de la continuité dans la construction des connaissances : dans le paradigme du traitement de l'information, les *procédures* sont souvent théorisées comme une information qui se transmet sans être reconstruite et transformée par chaque personne singulièrement et en fonction du contexte, et réduite à une suite d'actions ou suite logique qui serait commune à chacun. Or, c'est justement l'objectif des recherches sur les cheminements de pensée qu'établissent ces auteurs que d'étudier la singularité de ces cheminements, sans réduire ni généraliser les observations à des formes prédéterminées.

104. Je reviens en détail sur ce point au chapitre suivant.

part - tout apprentissage est aussi apprentissage d'un vocabulaire spécifique dont la maîtrise ne s'acquiert que progressivement à la suite de nombreuses tentatives plus ou moins heureuses - et des significations ou *objets de discours* Grize (1996) d'autre part, dont l'objectif à l'école est d'en faire des significations partagées et conventionnelles. Les recherches s'intéressant au processus d'argumentation permettent cette observation du langage et de la pensée en tant que phénomènes entremêlés [105].

Baker (2004) relève un paradoxe qui résume bien l'enjeu de cet échelon dans un milieu éducatif : si l'argumentation est comprise comme la défense de position "pour" ou "contre" dans un débat visant à convaincre ses adversaires, il est peu probable que les interlocuteurs puissent entrer dans un tel débat - et en particulier pour apprendre - vu qu'ils devraient pour cela adopter et défendre des positions et attitudes stables par rapport à des savoirs qui sont justement en cours d'élaboration [106]. Les travaux actuels dans ce domaine (voir p.ex. : Eemeren et al., 2014) permettent néanmoins d'aborder l'argumentation dans un sens plus large que celui d'une joute visant à convaincre, et d'observer des processus de construction de points de vue qui nous aident à comprendre la construction des connaissances par les élèves.

Pour Grize (1998), *argumenter* c'est davantage *montrer* que *démontrer* : si l'argumentation peut parfois viser à convaincre son interlocuteur en lui donnant des "preuves", celles-ci n'ont pourtant rien à voir avec une *démonstration* au sens strict de la logique. L'argumentation vise plutôt *l'adhésion* de l'interlocuteur - ce que Grize nomme après Blaise Pascal *persuader* - en lui *donnant à voir* son point de vue à travers une *schématisation* Grize (1995). C'est justement cet échelon discursif, cognitif et logique où les points de vue sont rendus visibles par les interlocuteurs qui nous intéresse tout particulièrement pour étudier les situations de malentendu en milieu scolaire. Cet échelon permet la description des points de vue sans les considérer comme fixés une fois pour toutes : la description d'un *point de vue* cristallise au mieux un moment au cours d'un processus de pensée, le *point de vue* étant toujours - au moins potentiellement - en transformation. Décrire un point de vue permet d'aborder les traces pour l'analyse de la pensée d'un élève

105. Exprimé avec un terme simple ici, cette idée d'une étude de "phénomènes entremêlés" fait écho à une approche de la *complexité*(voir p.ex. : Fabre, Weil-Barais, & Xypas, 2014 ; Morin, 1982/1990), dont nous pourrions fournir une représentation plus théorisée avec l'expression suivante : il s'agit de phénomènes en relations réciproques circulaires et coextensive, ou *majorantes* pour prendre un terme que Piaget utilise pour ce type de phénomène en parlant de l'abstraction ; autrement dit, ces phénomènes ne sont pas seulement des *boucles de rétro-action*, mais entretiennent une relation réciproque qui conduit à un développement dont l'image géométrique utilisée est celle de la spirale : les boucles de rétro-action conduisent à des contradictions ou oppositions, et à des dépassements de celles-ci qui permettent une construction au cours de la microgenèse.

106. Baker, 2004, p. 194, fait référence à Nonnon (1996) pour avoir relevé ce qu'il nomme un "paradoxe épistémo-cognitif" : "Aussi est-il peu probable que les apprenants puissent adopter de telles positions, ou attitudes, stables par rapport à des connaissances qui, par hypothèse, sont en cours d'élaboration (Nonnon,1996).".

à un moment donné, en situation. Se focaliser sur le processus d'*argumentation*[107] permet d'aborder les points de vue au cours de leur genèse et de leur transformation, en un mot en tant que processus.

Définir cet échelon comme un processus, c'est dire qu'une dimension temporelle fait partie intégrante de l'objet de notre attention. En conséquence, il s'agira de choisir un ordre de grandeur temporel pour rendre visible les phénomènes étudiés au moment des analyses. Il faut néanmoins distinguer les diverses mesures du temps : le temps comme durée, le temps du calendrier (ou épisodique), le temps subjectif. Ainsi, l'échelle temporelle choisie pour étudier l'apprentissage des élèves peut être définie par une durée comptée en heure - le *temps* passé à étudier - par un intervalle épisodique - du 1^{er} septembre 2005 au 31 janvier 2006 - ou encore par le temps tel qu'il est ressenti par les participants : dans ce temps subjectif, nous faisons l'hypothèse que les séance de Travaux Pratiques de physiques sont perçues par les élèves comme un temps continu qui s'échelonne au fil des mois mentionnés, quelles que soient les multiples activités des élèves entre les cours. Dans cette recherche, je me contenterai du concept de *moment* (voir le glossaire, p. 793 et suivantes), qui permet d'aborder un intervalle d'une durée variable, délimité par rapport à la continuité des activités des personnes impliquées - c'est-à-dire à une reconstruction du temps subjectif - de manière à situer les points de vue reconstruits selon ces moments pour les mettre en relation les uns les autres. En conséquence à cette opérationnalisation un peu simpliste, je fais l'assomption d'une cohérence interne aux moments ainsi délimités pour la reconstruction des points de vue. Je pourrai par contre ainsi contraster et discuter cette cohérence d'un moment à l'autre pour un élève ou un groupe d'élèves particuliers, de manière à évaluer l'hypothèse de transformation des points de vue d'un moment à l'autre. Je reviendrai plus en détail sur cette question du temps, sur la définition des moments, et sur la continuité de l'ensemble de l'activité documentée par la recherche au chapitre 4, lors de la présentation du corpus.

2.3.2.6 Décrire des points de vue en interaction les uns avec les autres : la question de *l'interprétation*

L'observation à cet échelon dépend de l'observation des processus de construction des points de vue effectuée au niveau individuel[108], et de la manière dont ils sont abordés : la discussion de la manière dont les points de vue interagissent les uns avec les autres dépend de la description des points de vue effectuée au préalable. Ainsi, cette interaction est également abordée ici comme un processus - nommé processus

107. *Argumentation* prend ici un sens large, et la définition de de *schématisation* de Grize que je le détaillerai au chapitre suivant (voir section 3.3.1) permet, à mon avis, de dépasser le problème méthodologique subséquent au paradoxe signalé par Baker et cité ci-dessus : s'intéresser à l'échelon des processus d'argumentation ne nécessite pas, dans ce cadre théorique, l'attribution aux acteurs d'une seule position, mais permet de jouer avec celles-ci en fonction du contexte. Les apprenants peuvent être considérés comme s'engageant dans une argumentation qui leur permet justement de jouer à adhérer à des positions dans un espace d'exploration. Au niveau méthodologique, cela permet au chercheur d'étudier la pensée en construction et de décider en fonction de la situation et de la progression du processus lorsque le point de vue éventuellement se transforme. Par ailleurs, la logique naturelle permet une articulation entre le cognitif et l'énonciation différente de celle envisagée par Baker et faisant usage de la logique des prédicats : au lieu d'une superposition de couches, nous pouvons aborder la pensée en construction en ce qu'elle est mêlée au langage (objets de discours) et à son usage (l'acte de prédiquer), la possibilité d'émettre des liens logiques étant directement dépendante du langage *et* de son usage. Cette double dimension lie définitivement l'expression et la pensée dans une relation réciproque circulaire extensive : acquérir des objets de discours permet d'en faire usage, et en faire usage permet de les acquérir, ce qui en retour permet de nouveaux usages, etc.

108. L'échelon individuel n'est abordé que comme un *processus* dans cette recherche, le processus de construction et de transformation d'un point de vue sur les questions posées et les tâches scolaires, à un échelon d'observation que j'ai choisi à hauteur de l'argumentation des élèves.

d'*interprétation* pour faire simple - et selon une dynamique de relation réciproque circulaire coextensive : un point de vue peut enrichir un autre, qui en retour enrichit le premier par sa manière de comprendre qui opère un léger déplacement du point de vue de son auteur, dans ce que Baldwin considère comme une créativité par "réaction circulaire avec variation" (Broughton & Freeman, 1982, p.XVIII) [109].

Pour illustrer cette manière d'aborder la question des rapports et relations entre les points de vue, j'en donne ci-dessous un principe qui en découle :

"Quand un interlocuteur ne comprends pas le point de vue d'un autre, elle ou il comprend néanmoins quelque chose de son point de vue..."

Ce principe n'est pas trivial : il consiste à assumer le potentiel créatif des échanges de points de vue. Lorsqu'il y a échec, même partiel, à l'interprétation du point de vue d'autrui, l'interprétant ne reconnaît souvent pas cet échec en tant que tel [110] mais construit un point de vue fictif qu'il attribue au locuteur. S'il exprime ce point de vue fictif, son interlocuteur adaptera sa communication à cette attribution que lui fait l'interprétant de son point de vue, par exemple pour "corriger le tir" et tenter de retrouver auprès de son interlocuteur une représentation de son point de vue plus proche de ses intentions. Mais à ce moment-là le premier locuteur devient également interprétant, et peut aussi comprendre autre chose que ce que le premier interprétant avait l'intention de lui dire : dans cet enchaînement circulaire de rétro-actions, les interlocuteurs peuvent *ensemble* construire une représentation de leurs points de vue réciproques qui s'oriente progressivement vers une compréhension mutuelle [111] ou, au contraire, construire une représentation des points de vue réciproques qui s'éloigne d'une compréhension mutuelle, en inventant des points de vue fictifs qu'ils attribuent à tort à leur interlocuteur, jusqu'à ajouter une couche successive de malentendu à chaque rétro-action.

Aborder l'échelon des interactions entre les points de vue comme une dynamique créative, basée sur les conduites de *répétition avec variation* de la psychologie de Baldwin ou Piaget, n'est pas trivial : dans le paradigme mécaniste qui aborde les interactions sociales comme des influences de type cause-effet, ou comme un traitement d'information dont les chercheurs discuteront de la réussite ou de l'échec, le potentiel créatif des relations circulaires réciproques coextensives échappe à l'observation. J'inclurai cet aspect dans cet échelon en me donnant les moyens [112] de montrer les reprises avec variation lorsque je mettrai en contraste les points de vue des uns avec ceux des autres à travers les descriptions que j'en aurai faites.

109. Cet ouvrage explique la proximité de l'interprétation des *processus* d'évolution de l'organisme de Darwin que font Baldwin et Piaget, et leur usage en psychologie dans un paradigme organique qui rompt avec le paradigme mécaniste, pourtant encore dominant aujourd'hui en sciences cognitives.

110. Ce cas de figure existe aussi, puisque ds personnes prudentes en communication peuvent reconnaître ne pas avoir compris et demander une clarification en suspendant leurs hypothèses interprétatives... mais c'est plutôt l'exception que la norme.

111. J'utilise le terme *compréhension mutuelle* au lieu de celui d'*intersubjectivité*, bien que ce dernier conviennent tout à fait dans son sens original (Grossen, 1988 ; Kant, 1790/1984 ; Schubauer-Leoni et al., 1992), parce que nous n'étudions pas la dimension affective ou de synchronisation émotionnelle à laquelle fait référence le concept d'intersubjectivité chez d'autres auteurs (voir p. ex. : Gilliéron, 1983 ; Trevarthen & Aitken, 2003).

112. Les moyens utilisés sont présentés dans le cadre théorique du chapitre suivant, et reposent tout particulièrement sur les travaux de Trognon (1989) ; Trognon et Brassac (1992) ; Trognon et Larrue (1988b), qui montrent comment les reprises conversationnelles peuvent jouer ce rôle de "répétition avec variation" dans une étude de *l'enchaînement conversationnel*.

Cet échelon permet d'observer le processus de reprise et de transformation du point de vue de l'enseignant par un ou plusieurs élèves au cours de leurs activités, dont je m'attends à ce qu'ils permettent de rendre compte au moins en partie des réponses des élèves jugées erronées par l'enseignant, et/ou que la littérature théorise comme des *conceptions* des élèves. Au lieu d'attribuer les réponses exprimées par les élèves, ou leurs conduites, à ces conceptions, je tenterai de montrer qu'elles procèdent de processus de construction de sens qui ne sont pas seulement des divergences entre les points de vue, mais des reprises par les uns des points de vue exprimés par les autres, dans des processus constitutifs de situations de malentendu. Au lieu d'une explication qui ne fait qu'attribuer la responsabilité d'une réponse à l'élève, en déclarant qu'il avait une conception le conduisant à répondre de telle manière au problème proposé *avant* d'arriver à l'école (alors que l'observation du chercheur est parfois faite *pendant* ou *après* la scolarisation), je pourrai analyser à cet échelon le décalage entre le sens que l'enseignant donne aux discours énoncés ou circulant dans la classe, et le sens que leur donne un ou plusieurs élèves *alors qu'ils tentent justement de reprendre ces discours et de se les approprier*.

Les travaux s'intéressant à l'échelon supra-individuel dans l'apprentissage (voir p.ex. : Lave, 1991 ; Lave & Wenger, 1990) sont presque toujours aveugles aux contenus particuliers des savoirs en jeu. Par exemple, la recherche de Mercer et Wegerif (1998), qui est l'une de celle qui s'intéresse au plus près à l'évaluation des échanges - et des reprises - pour en tirer des conclusions quant aux processus d'apprentissage des élèves lors de ces processus de communication ; mais l'observation des apprentissages porte sur des *types d'interactions* et non pas sur des interactions particulières ou des objets de savoir particuliers. Les travaux de la *logique interlocutoire* (voir p.ex. : Trognon et al., 2003) font figure d'exception et m'ont permis de penser à cet échelon en ces termes. Par ailleurs, c'est comme si l'apprentissage devait toujours être observé à l'échelon individuel dans les démarches méthodologiques utilisées. Je propose ici de l'observer aussi à l'échelon des interactions, c'est-à-dire de proposer une description qualitative du processus d'échange, de mélange et de "reprise avec variation" entre les points de vue, dont Perret-Clermont (1979) a fait la démonstration expérimentale de l'effet *en général* en montrant l'effet catalyseur des conflits socio-cognitifs sur la pensée en développement. L'objectif de la recherche, à cet échelon, est de reconstituer les interprétations que font les élèves des discours des autres élèves, de l'enseignant et des autres ressources sémiotiques disponibles en classe lors de la construction de leur point de vue, notamment en observer dans le détail les reprises d'objets de discours au cours des interactions sociales entre élèves et avec l'enseignant.

2.3.2.7 Comparer des points de vue divergents : la question de la *situation*

Les élèves ne donnent du *sens* aux savoirs enseignés qu'en référence à une *situation* : ce constat est étayé par les recherches du courant socio-cognitif depuis longtemps (pour une synthèse, voir p.ex. : Perret-Clermont & Carugati, 2004), et par d'autres courants de recherche, comme les travaux du modèle de l'*action conjointe* de Sensevy, 2011, qui fournit des exemples en didactique des sciences, ou encore le modèle de l'argumentation de Rigotti, 2006 ou le traité de Perelman et Olbrechts-Tyteca (1958/2000), qui permettent de théoriser le contexte en rhétorique, de nombreux travaux sur la construction du sens dans les interactions sociales adoptant l'approche de la psychologie culturelle ou les principes dialogiques

(voir p.ex. : Grossen, 1999 ; Nonnon, 1996), ou encore par la théorie des situations didactiques (voir p.ex. : Brousseau, 1998/2004 ; Douady, 1984).

Si le recours des interlocuteurs à une *situation d'interlocution*[113] (Grize, 1996) est indispensable à leur construction de sens, à leur interprétation et appropriation des savoirs enseignés, cela nous conduit à nous focaliser, quatrièmement, sur un échelon supra-individuel à hauteur de la *situation*. Cet échelon inclut des éléments psychosociaux, culturels et historiques plus vastes que les interactions inter-individuelles, sur lesquels ces interactions s'appuient pour permettre une éventuelle et partielle compréhension mutuelle. La *situation* constitue également un échelon qui s'observent *en creu* : pour ce qui, à l'occasion, apparaît *absent* à une situation particulière du fait d'un manque de ressources que l'analyse des processus d'interprétation met en évidence. C'est notamment le cas lorsque les implicites de la communication font référence à des éléments qui ne sont pas partagés par tous les participants : le sens donné par les acteurs aux significations décrits aux autres échelons permettent alors d'observer à l'échelon de la situation que celle-ci fournit un milieu fonctionnel aux processus d'adaptation ou d'intériorisation des savoirs enseignés (l'*individuation des connaissances*), ou qu'elle conduit les participants à des accidents de communication, bien malgré eux, ce que je définirai justement comme des *situations de malentendu*.

L'échelon de la situation nous servira essentiellement de référentiel lors de la description de la construction des points de vue par les acteurs impliqués. J'ai déjà argumenté l'importance de bénéficier d'un tel référentiel pour les savoirs, tout en évitant d'en faire un "acteur" comme nous serions tenté de le faire en faisant usage de la métaphore "point de vue du savoir". Utiliser la situation comme référentiel permet de disposer d'un point fixe, décrit par le(s) chercheur(s) pour un corpus donné, auquel rapporter les points de vue et les échanges, qui sont tous des processus mouvants et hautement dynamiques. Sans point fixe, les changements dans cette dynamique et ces processus ne peuvent pas être décrits. Par contre, l'échelon de la situation n'est pas envisagé ici dans un rapport déterministe aux processus observés : elle figure comme point de référence et non comme "cause" des comportements individuels ou des déplacements et transformations des significations : c'est l'avantage d'en faire un "échelon" d'observation et non un "objet", que l'on serait tenté de réifier lors du processus de théorisation[114].

L'observation à l'échelon de la situation visera dans cette recherche la description d'un référentiel, permettant de caractériser les points de vue des différents acteurs à différents moments des processus étudiés et, en particulier, à pouvoir établir des divergences entre ces points de vue relativement au référentiel adopté.

Le fait de placer le phénomène du malentendu à l'échelon de la *situation* n'est pas trivial : c'est une manière d'éviter d'attribuer le malentendu à des individus, qui seraient alors considérés responsables de leur mauvais compréhension ou interprétation. Or, ces processus complexes d'interprétation reposant en

113. Je reviendrai en détail sur ce concept plus loin (voir section 3.3.4, p. 182).
114. En effet, le rapport entre phénomènes à des échelons différents est plus complexe et subtil que ne permet de le théoriser le concept de *causalité* : un exemple inspiré de la chimie de ce que pourrait être le rapport d'une situation à des conduites individuelles ou à des processus cognitifs est celui de *catalyseur* (pour l'adaptation du concept en psychologie, voir Cabell & Valsiner, 2014).

grande partie sur la situation elle-même, comme je l'ai rappelé ci-dessus, notre approche théorique ne peut procéder à une telle attribution de responsabilité *en général* et sans mener l'enquête pour chaque situation singulière et pour chaque divergence de point de vue. Enfin, je tenterai justement de montrer, en focalisant cette recherche aussi sur l'échelon des situations, que dans bien des cas ce sont des catalyseurs proprement *situationnels*[115] qui conduisent élèves et enseignants dans une forme ou l'autre de malentendu, sans que l'on puisse identifier un seul acte individuel qui les y conduirait.

2.3.2.8 Synthèse

J'ai argumenté le choix de focaliser cette recherche sur quatre échelons d'observation, qui me semblent indispensables à une théorisation de l'apprentissage des sciences qui permette d'avancer dans le débat :

1. La *situation*, qui constitue le référentiel nécessaire à la mise en contraste du sens construit par les diverses personnes en situation, justement, et à des moments particuliers.
2. L'*interprétation* par les interlocuteurs des points de vue des uns et des autres, par la médiation sociale et symbolique (des discours, gestes, etc.) et conçue comme un système dynamique où des "reprises avec variation" introduisent une dimension créative dans le développement plus ou moins accompli d'une compréhension mutuelle, sous la forme d'interactions réciproques circulaires coextensives.
3. Les *processus de construction de points de vue*, dont l'*argumentation* fournit une opérationnalisation de ce qui en est observable par les discours et leurs usages.
4. Le *sens* que prennent à des moments particuliers pour des interlocuteurs particuliers des éléments spécifiques (objets de discours, images, tâche, etc.) sur lesquels s'exerce la pensée des personnes impliquées, et qui font l'objet d'opérations, de partage, d'appropriation, de négociation et de transformation : ces éléments spécifiques s'observent ici au niveau sub-individuel pour pouvoir mettre en évidence à la fois les contenus et les processus de pensée.

Le choix de ces échelons justifie la construction de notre cadre théorique, et en particulier le choix de la logique naturelle à la fois comme approche de la communication articulant langage et cognition, mais aussi comme outil d'analyse des données verbales construites dans notre recherche empirique.

Je pense ces échelons non seulement indispensables séparément, mais aussi dans leurs rapports complexes les uns aux autres, de manière à donner les moyens d'observer au cours de cette recherche d'éventuels liens entre eux, où ce qui se passe à un échelon particulier crée d'autres phénomènes à d'autres échelons, que l'on ne pourrait expliquer uniquement à leurs niveaux respectifs.

Ainsi, nous partons de l'hypothèse que la notion de malentendu nous permet de montrer autre chose que les recherches existantes sur les conceptions, en particulier parce que le choix de les aborder par les

115. Par exemple les liens imprévus et malencontreux entre des ressources sémiotiques fournies aux élèves et pensées séparément, l'interruption d'un discours par une question dans le flux des activités, la polysémie d'un terme linguistique en français, etc.

situations de malentendu nous a conduit à expliciter la question de l'échelle d'observation afin de construire un autre niveau d'analyse du phénomène [116].

116. L'appel de Tiberghien (1997) pour une *granularité* plus fine dans les recherches futures a clairement inspiré cette démarche.

Chapitre 3

Coordination des approches choisies

Dans ce chapitre, je présente brièvement des approches du phénomène des malentendus dans diverses disciplines académiques, pour concentrer ensuite mes propos sur les recherches et théories utilisées pour aborder les processus d'apprentissage. Les approches ne sont que brièvement mentionnées pour préparer le travail empirique et pour signaler qu'elles ont inspiré et rendu possible cette recherche. Ces approches élargissent la problématisation au-delà d'une conceptualisation individuelle de l'apprentissage, en intégrant au problème de l'apprentissage des sciences les situations sociales, les dimensions historico-culturelles et les processus de communication et de sémiose.

Ainsi, ce chapitre remplit deux fonctions :

— premièrement, il permet d'évoquer [117] les principaux éléments du cadre théorique utilisé pour observer et analyser le corpus de traces ;

— deuxièmement, il permet de situer la perspective [118] de cette recherche dans la littérature : en expliciter les origines permet de se faire une idée de l'*orientation* de la perspective construite pour aborder les situations de malentendu.

Si je présente ci-dessous ces quelques approches *les unes après les autres*, ce n'est que pour en faciliter l'exposition ; je tenterai en effet de montrer que les approches choisies s'intègrent les unes aux autres, de manière à enrichir une psychologie socio-génétique de l'apprentissage centrée sur les processus qui permet une *science des cas particuliers* - et du *sujet psychologique* - produisant des résultats descriptifs. Ce chapitre ne vise pourtant pas l'exposition de l'ensemble permettant de constituer une théorie de l'apprentissage socio-génétique, dont je n'esquisse ici que quelques-uns des composants, sélectionnés pour leur importance pour cette recherche.

Ce bref parcours à travers la littérature aboutit à une formulation de la principale question de recherche.

117. Pour des questions de volume, je ne fais guère plus qu'une *évocation* des travaux qui ont rendu possible et inspiré ma perspective sur le problème de l'apprentissage des sciences, sans en fournir l'exposition systématique que ces recherches et théories mériteraient. Les lecteurs intéressés sont priés de se reporter aux textes cités si nécessaire.

118. Cette perspective est conçue comme *intégrative* - un objectif de l'approche socio-cognitive qui remonte au moins à Perret-Clermont et Schubauer-Leoni (1989) - c'est-à-dire qu'elle cherche à intégrer les diverses recherches et théories présentées pour aborder l'apprentissage dans une psychologie de l'apprentissage constituant une théorie cohérente prenant en compte la complexité du phénomène dans son ensemble ; néanmoins, comme la constitution de cette théorie n'est pas l'objet ici, je me limite à *en faire usage* pour les objectifs de cette recherche, ce qui constitue une première mise à l'épreuve de l'assemblage proposé.

À la fin de ce parcours, je ne proposerai pas d'organisation explicite de cette coordination - une tâche bien plus ambitieuse que cette recherche - mais uniquement une "pièce manquante" à ce qui pourrait ressembler à un vaste puzzle, "pièce" qui permet de faire le lien entre les diverses approches réunies et qui m'a rendu possible leur intégration en une seule perspective dans cette recherche. En l'état, je ne peux guère davantage que fournir une image de cette coordination, dont la théorisation m'est encore hors de portée actuellement : la figure 3.1 (ci-dessous) pallie à ce manque par une métaphore graphique [119], à défaut d'un discours organisé et plus détaillé.

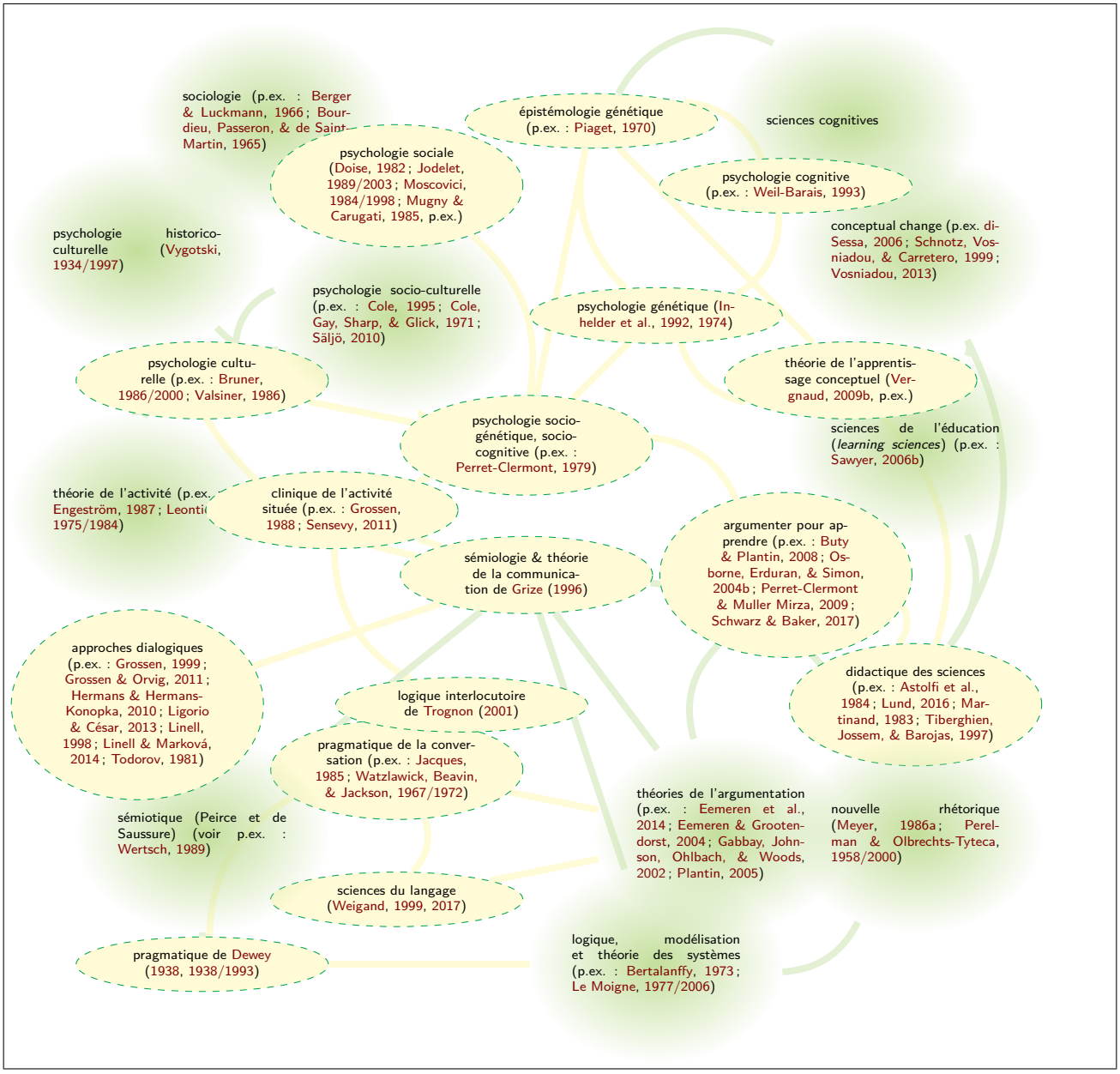


FIGURE 3.1 – Métaphore graphique de la coordination des approches visitées dans cette recherche.

119. Le choix des noms d'auteurs comme représentant d'une approche contient évidemment une part importante d'arbitraire, que je prie les personnes lésées par ces choix d'attribuer à la spécificité de mon parcours intellectuel - et à mon ignorance - plutôt qu'à d'autres raisons. Il m'a semblé néanmoins utile de placer des noms, pour éviter l'impression d'un aperçu vague et impersonnel de la littérature : les noms mentionnés permettent dans tous les cas au moins une entrée dans les champs de littérature ainsi identifié, à défaut bien entendu de se révéler suffisants pour une véritable histoire des idées.

La métaphore graphique présentée dans la figure 3.1 n'offre qu'un panorama peu détaillé : elle permet néanmoins de suggérer les innombrables rapports complexes entre les approches qui ont inspiré cette recherche. Cette figure met néanmoins en évidence les liens entre diverses approches, librement interprétés à partir de l'histoire scientifique de ces approches et de leur pertinence pour l'objet de cette recherche : le phénomène de l'apprentissage. Elle permet de donner une image de la difficulté d'une coordination systématique des nombreuses approches pertinentes, mais aussi de la fertilité de leur mise en relation.

Cette figure met aussi en image la centralité de l'approche de Grize pour une approche socio-cognitive de l'apprentissage, d'une part, et des recherches récentes que j'ai dénommées un peu simplement "argumenter pour apprendre", et qui établissent des liens nouveaux entre des traditions sinon souvent éloignées les unes des autres, comme le champ de la didactique des sciences et la rhétorique. Ces liens me donnent espoir de pouvoir procéder, lors du travail empirique, à des aller-retour entre les dimensions de l'apprentissage que les diverses approches éclairent différemment, constituant en quelque sorte un "pont" théorique permettant une enquête sur le phénomène de l'apprentissage aux divers échelons que nous avons choisi pour cette recherche.

Dans la suite de ce chapitre, j'évoque [120] les apports de ces approches à la compréhension du phénomène de l'apprentissage. Lors de cette présentation, les approches discutées (celles sur fond jaune dans la figure 3.1) ne sont pas toujours nommées de manière identique à ce qui apparaît sur la figure ci-dessus : c'est qu'il y a bien des manières de fournir une telle synthèse, et résumer ainsi les courants de recherches est toujours discutable. Ces dénominations sont elles-mêmes problématiques, et je prie le lecteur de ne pas prendre trop au sérieux les choix effectués pour la dénomination et la délimitation de ces approches dans la figure 3.1, ni d'examiner avec trop de rigueur les exemples de recherches cités par rapport aux innombrables autres exemples possibles : ce serait faire un usage de cette figure qui va au-delà de son ambition. Elle ne sert ici qu'à fournir quelques indications, quelques traces, pour permettre de retrouver le fil de traditions de recherche dont l'histoire scientifique est bien plus complexe que ne peut le représenter cette métaphore graphique.

120. Le terme "évoquer" est utilisé ici délibérément, pour indiquer que ma présentation est trop brève pour constituer une véritable présentation de ces approches. Pour éviter un trop long discours introductif à cette recherche, je prie la lectrice, le lecteur, de se référer aux différentes publications citées si nécessaire.

Sommaire

3.1 Approches du phénomène de malentendu . . . 99
3.1.1 Approches sociologiques . . . 99
3.1.2 Approches en psychologie et sciences de l'éducation . . . 100
3.1.3 Approches des sciences du langage . . . 104
3.1.3.1 Le malentendu comme un acte de communication qui échoue . . . 105
3.1.3.2 Le malentendu dont les interlocuteurs n'ont pas conscience . . . 109
3.1.3.3 Le malentendu : distinctions et définitions . . . 112
3.2 Approches de l'apprentissage . . . 119
3.2.1 Ancrage en épistémologie génétique et en psychologie (micro)génétique . . . 120
3.2.2 Une approche clinique de l'activité située . . . 122
3.2.3 Une approche psychosociale de la construction des représentations . . . 123
3.2.4 Une approche cognitive des processus et des connaissances . . . 126
3.2.5 Une approche socio-génétique et socio-cognitive . . . 130
3.2.6 Une approche cybernétique et pragmatique de la communication . . . 133
3.2.7 Une approche interlocutoire de l'apprentissage . . . 135
3.2.8 Une approche socio-culturelle de l'apprentissage . . . 142
3.2.9 Une approche dialogique de la subjectivité . . . 144
3.2.10 Une approche historico-culturelle du langage et des instruments . . . 149
3.2.11 Des approches en didactiques des sciences . . . 152
3.2.12 Une approche centrée sur l'argumentation . . . 155
3.3 Une approche pour coordonner les autres . . . 159
3.3.1 Introduction à l'oeuvre de Grize . . . 159
3.3.2 Brève histoire de la logique naturelle . . . 166
3.3.2.1 Ancrage dans le projet d'épistémologie génétique de Jean Piaget . . . 166
3.3.2.2 Une logique de l'action, non formelle. . . . 168
3.3.2.3 Un retour aux sources de la logique : l'argumentation. . . . 170
3.3.2.4 Un développement théorique transdisciplinaire. . . . 173
3.3.2.5 Un programme de recherche en cours. . . . 174
3.3.3 Une théorie de la connaissance . . . 175
3.3.3.1 Notions, concepts, théorie et langages formels . . . 176
3.3.3.2 Systèmes clos et systèmes ouverts . . . 177
3.3.3.3 Axiomatisation et modèles . . . 178
3.3.4 Une théorie de la communication . . . 182
3.3.4.1 Les cinq postulats de la communication. . . . 182

3.3.4.2 Une logique dialectique . . . 186
3.3.4.3 Schématisation . . . 190
3.3.5 Une sémiologie . . . 193
3.3.5.1 Une théorie du signe . . . 194
3.3.5.2 Opérations logico-discursives . . . 200
3.3.6 Synthèse et ajustement de la terminologie . . . 210
3.3.6.1 Une démarche d'analyse pour les sciences humaines . . . 210
3.3.6.2 Ajustement de la terminologie . . . 211
3.3.6.3 Commentaires . . . 214
3.4 Question de recherche et opérationnalisation . . . 221
3.4.1 Vers une définition des *situations* . . . 222
3.4.2 Définition des *situations de malentendu* . . . 226
3.4.2.1 Critères pour déterminer des *situations de malentendu* . . . 226
3.4.2.2 Définition de la divergence . . . 228

3.1 Approches du phénomène de malentendu

Le malentendu est abordé dans cette recherche comme un phénomène intéressant à observer pour avancer dans la théorisation de l'apprentissage des sciences en milieu scolaire. S'intéresser aux malentendus ne relève pas d'un pessimisme dont la thèse consisterait à suspecter qu'enseignants et élèves - et chercheurs - ne se comprennent jamais vraiment [121]. Il s'agit plutôt de montrer, au contraire, que chercheurs, enseignants (et en moindre mesure élèves) prennent pour allant de soi des interprétations ou des attributions qui, de fait, sont le résultat de processus complexes qui échouent parfois. Or, ces "échecs" sont susceptibles de nous renseigner sur les processus eux-mêmes, à la fois quand ils réussissent et quand ils échouent, et tout particulièrement sur les difficultés d'appropriation des savoirs de mécanique newtonienne.

Le phénomène de malentendu est donc prétexte à une investigation portant sur les processus d'apprentissage, à travers l'analyse de processus de construction de sens, d'élaboration d'un point de vue, d'interprétation et de coordination avec d'autres points de vue, et de genèse de *situations de malentendu*. En ce sens, le phénomène de malentendu est abordé ici comme objet d'étude en psychologie. Peu étudié en sciences de l'éducation, ce phénomène a néanmoins intéressé d'autres disciplines depuis longtemps, dont quelques travaux sont brièvement présentés au fil de ce chapitre.

3.1.1 Approches sociologiques

Parmi les recherches s'intéressant aux malentendus, se trouvent les travaux de sociologie portant sur la reproduction des inégalités sociales à l'école (Bourdieu & Passeron, 1970 ; Bourdieu et al., 1965 ; Bourdieu, Passeron, & De Saint Martin, 1994 ; Passeron, 1991). Ces travaux mettent en évidence un processus de *fabrication* de l'échec scolaire, qui remet en cause l'attribution individuelle de l'échec à des élèves singuliers. Ces travaux font l'hypothèse générale d'un malentendu entre les élèves des milieux défavorisés et les attentes de l'institution scolaire, qui conduiraient ces derniers à échouer plus fréquemment que les élèves mieux au fait de la culture scolaire, ou au moins à ne pas bénéficier d'une valorisation de leur travail scolaire à la hauteur de leurs aptitudes. Cette dévalorisation peut elle-même conduire à la réduction des performances scolaires de cette catégorie d'élève (Rosenthal & Jacobson, 1968). Par la suite, cette découverte a été étayée par des travaux sur la fabrication des inégalités réelles par le système scolaire (voir p.ex. : Perrenoud, 1989, 1994/1995).

Les recherches se poursuivent aujourd'hui avec des investigations plus fines qui permettent d'étayer l'hypothèse d'un malentendu sur les attentes scolaires à l'origine de la reproduction des inégalités scolaires (Bautier & Rayou, 2009 ; Bautier & Rochex, 1997 ; Margolinas & Laparra, 2009), et cela malgré les nouveaux apports des didactiques disciplinaires à la pratique des enseignants. Bautier (2015) montre par exemple que la complexité des nouveaux supports d'apprentissage peut conduire à des malentendus défa-

121. Au sens strict, c'est néanmoins évidemment le cas, quoique en moindre mesure, puisque toute communication implique une reconstruction du sens par l'interlocuteur qui n'est jamais tout-à-fait identique au sens voulu par l'énonciateur. Cependant, cette remarque se réfère à des divergences de sens de moindre mesure, que nous ne considérons pas forcément comme des malentendus au quotidien, et surtout qui ne permettent certainement pas de remettre en cause l'efficacité de l'enseignement en milieu scolaire.

vorisant les élèves de milieux sociaux spécifiques. D'autres travaux (Bonnéry, 2015 ; Bonnéry, Crinonand, & Simons, 2015) mettent en évidence une nouvelle forme de reproduction des inégalités, plus discrète, où le malentendu sur les attentes scolaires est intégré à une pédagogie par objectifs où les élèves des milieux défavorisés sont induits à réaliser des tâches de bas niveau taxonomique (apprentissage par cœur, etc.) pour viser une performance tout juste suffisante, alors que les tâches plus complexes et intéressantes (discussion critique, mise en perspective d'un document, etc.) sont réservées aux élèves qui maîtrisent déjà les attentes scolaires du fait de leurs origines sociales, du fait que ces derniers parviennent - par le phénomène de malentendu cité - à interpréter les attentes pour réussir les objectifs déterminant la différence entre les performances minimales et pour passer son année scolaire et les performances plus élevées permettant d'accéder aux études supérieures.

Les travaux sociologiques cités ci-dessus sont actuellement prolongés par des études dans le cadre théorique de l'*action conjointe* (Rayou & Sensevy, 2014), permettant de mettre en évidence des situations de malentendu au niveau du *contrat de communication* ou *contrat didactique* : des "logiques" divergentes sont observées, ou encore des "jeux alternatifs" (Cariou, Kervran, & Rilhac, 2015) que certains élèves mettent en place au détriment du "jeu d'apprentissage" attendu par l'institution ou l'enseignant.

Ce bref aperçu des approches sociologiques des malentendus à l'école permet de mettre en perspective notre investigation visant la description de *situations de malentendu* dans l'apprentissage des sciences : les résultats de cette recherche peuvent contribuer à montrer comment, dans le détail, se reproduisent les inégalités sociales au fil des générations. Comme cette recherche s'intéresse à des élèves de lycée (dans un gymnase suisse), une sélection scolaire drastique a déjà eu lieu pour ces élèves [122] : le corpus de cette recherche n'est donc pas propice à l'observation d'élèves issus de milieux défavorisés, d'une manière générale. Cependant, le gymnase en question est situé dans une région périphérique dont le bassin de population permet tout de même à des jeunes de ces milieux d'accéder à la maturité gymnasiale et, surtout, nous pourrons observer une autre dimension de la reproduction des inégalités sociales liées spécifiquement à l'enseignement de la physique : le biais de valorisation induit par le genre des élèves. Ainsi, les résultats permettront de mettre en évidence des malentendus conduisant les filles à être sous-évaluées par rapport à leurs aptitudes réelles et à leurs homologues masculins.

3.1.2 Approches en psychologie et sciences de l'éducation

Dans le domaine de la psychologie et des sciences de l'éducation, quelques travaux s'intéressent au malentendu ou à des phénomènes semblables en milieu scolaire. Par exemple, Zakhartchouk et Castincaud (1990) s'intéressent à la compréhension des consignes par les élèves, un problème bien connu des enseignants. Les auteurs abordent cette question à partir de leur expérience professionnelle, et fournissent des pistes praxéologiques.

122. En Suisse, seul 19% des élèves d'une classe d'âge obtiennent une maturité gymnasiale au moment de la recherche, en 2005 (source : Office Fédéral de la Statistique, document je-f-15.03.02.01).

D'autres recherches, plus nombreuses, s'intéressent à la construction du sens par les élèves (dont voici quelques exemples en français : Canelas-Trevisi, Guernier, Cordeiro, & Simon, 2009 ; Forget & Schubauer-Leoni, 2008 ; Gilly et al., 1999 ; Ligozat & Leutenegger, 2008 ; Muller Mirza & Perret-Clermont, 2008 ; Schubauer-Leoni & Perret-Clermont, 1980, 1984), et se trouvent ainsi de fait sur une question proche de celle du malentendu, même si elles ne conceptualisent pas explicitement le malentendu. Elles soulèvent néanmoins de nombreuses questions qui ont participé à l'émergence de la question de cette recherche et de la focalisation sur les malentendus dans le but d'explorer les processus d'apprentissage des élèves dans un corpus particulier.

Parmi les publications évoquant le phénomène du malentendu, un article a particulièrement inspiré cette recherche, notamment parce que les enjeux du malentendu en milieu scolaire sont davantage développés : Perret-Clermont (1992) met en évidence le lien entre les recherches en sociologie sur la reproduction des inégalités sociales (voir la section précédente), les recherches en psychologie socio-cognitive et le fonctionnement du système scolaire en pointant le risque important de malentendus à travers de nombreuses anecdotes. Ce texte soulève de nombreuses questions, voire peut-être même un programme de recherche : questionner les *implicites* des situations d'apprentissage. Ces *implicites*, cependant, n'apparaissent aux chercheurs qu'à l'occasion de malentendus effectifs, qui jouent le rôle de *révélateur* - au sens de la chimie - des attentes du système scolaire et de son fonctionnement. En s'emparant d'un terme des sciences du langage en psychologie - les implicites - Perret-Clermont (1992) ouvre un champ de recherche interdisciplinaire, nouveau, et riche d'un grand potentiel. Cependant, la difficulté méthodologique de son exploration - les implicites étant par définition "invisibles" dans les traces recueillies par les chercheurs - fait que ce champ est encore aujourd'hui largement à explorer. De plus, ce champ d'investigation autour des implicites - ou des malentendus - est justement celui que les sociologues désignent comme le lieu de la reproduction des inégalités sociales par l'institution scolaire, lien que Perret-Clermont (1976) établit au tout début de ses travaux de recherche en posant l'hypothèse que les différences de performances des élèves en milieu scolaire s'expliqueraient plutôt par des habitudes différentes - prenant leurs origines dans les milieux socio-culturels des familles - que par des capacités cognitives différentes.

L'intérêt d'une approche basée sur l'étude de la communication pour comprendre les processus d'apprentissage et les enjeux du système scolaire a été soulignée par Perret-Clermont (1976) dénonce une sur-évaluation, dans les travaux de recherche portant sur les problématiques d'éducation comme l'échec scolaire ou les difficultés d'apprentissage, des facteurs psychologiques - c'est-à-dire attribués aux personnes en tant que propriétés idiosyncratiques - et sociologiques - également attribués aux personnes en fin de compte, via l'appartenance à un groupe ou à une classe sociale. Dans une publication plus récente, Perret-Clermont (2000) montre comment le problème de l'échec scolaire peut être réinterprété du point de vue de la communication :

> *Au cours du précédent exposé, on a déjà pu voir que l'objet de la préoccupation de ces recherches s'est transformé : de la problématique initiale centrée sur les échecs et les incompétences soi-disant individuelles de l'apprenant ou de l'enseignant, on en vient, peu à peu, afin de rendre compte*

> *des observations, à reposer le problème en termes de communication et d'instrumentation de cette communication.*
>
> *(Perret-Clermont, 2000, p. 119)*

Ce réductionnisme des différences entre enfants à des différences psychologiques a pour conséquence d'éviter "par là même de tenir compte de la spécificité des systèmes de relations sociales et de communication qu'elle [l'école] met en jeu dans son mode propre de fonctionnement" (Perret-Clermont, 1976, p. 3).

Cette recherche poursuit le travail dans la même hypothèse, en étudiant les situations de malentendu afin de mieux comprendre ces processus sociaux et historico-culturels à l'origine de la construction des significations chez l'apprenant. Aborder l'apprentissage par la communication conduit à adresser la question des malentendus, comme l'illustre cet extrait présentant les résultats de plusieurs recherches expérimentales sur les dialogues entre experts et novices :

> *... un dialogue entre un novice et un expert est toujours une longue histoire de malentendus. Ceux-ci permettent l'apprentissage s'ils sont assumés comme tels. Si ce n'est pas le cas, et que l'échec de la communication est attribué de façon unilatérale à l'un des partenaires (par exemple au stade de l'enfant, à son immaturité ou à l'inintelligibilité du professeur, etc.), alors l'interlocution s'interrompt. Et la transmission de la connaissance aussi !*
>
> *(Perret-Clermont, 2001, p.70)*

L'approche socio-cognitive brièvement évoquée ci-dessus s'est développée en lien avec l'approche socio-culturelle, inspirée de la psychologie historico-culturelle russe (pour une synthèse en français, voir : Rochex, 1997)[123], et la critique inspirante des travaux piagétiens qu'elle produit (voir p.ex. : Hundeide, 1988 ; Rommetveit, 1978 ; Säljö, 1991). Cette approche centre justement l'attention sur des concepts comme la "logique sociale" et la "situation" (à ce sujet, voir aussi : Goffman, 1964), de manière à mettre en perspective la possibilité d'un malentendu - de grande envergure ! - entre chercheurs et participants aux recherches. L'approche socio-culturelle s'intéresse aussi directement au milieu scolaire (voir p.ex. : Säljö & Wyndhamn, 1993) en montrant comment le milieu scolaire n'est pas seulement un contexte social et institutionnel, mais aussi un contexte pour la pensée des élèves, qui interprètent différemment une tâche pourtant identique selon qu'elle leur est proposée en classe ou qu'elle leur échoit hors de l'école. Ce problème, connu dans la littérature comme le problème du *transfert* des apprentissages (D. W. Carraher & Schliemann, 2002), est proche de la question des malentendus puisque l'institution scolaire vise justement la transmission des ces savoirs pour une utilisation hors de l'école et après la scolarisation, que les élèves ne reconnaissent pourtant pas en tant que telle quand bien même ils réussissent en milieu scolaire. C'est l'objectif même de l'institution scolaire qui semble faire l'objet d'un malentendu entre élèves et enseignants.

123. Si les textes russes n'ont été que tardivement accessibles en anglais (voir p.ex. : Vygotsky & Luria, 1994), et en français (voir p.ex. : Vygotski, 1934/1997), il convient néanmoins de préciser que le texte de Vygotski et Luria date de 1934. De manière à signaler la langue de traduction des textes de Vygotski dans la référence, j'ai utilisé l'orthographe française du nom de l'auteur pour un texte traduit en francais - *Vygotski* - et l'orthographe anglaise du nom pour un texte traduit en anglais - *Vygotsky*.

Karlgren et Ramberg (2012) s'inspirent de cette approche pour proposer des *structures de conception* (*"design patterns"*) dans le but de diminuer les malentendus et ruptures de communication dans le travail collaboratif des concepteurs ("designers"). Cette recherche orientée vers une amélioration des pratiques dans un domaine professionnel montre que la communication peut bénéficier d'un outillage spécifique, en particulier concernant la justification et la délimitation du problème discuté entre les acteurs. Son orientation praxéologique fait qu'elle ne fournit cependant pas non plus de conceptualisation du malentendu.

En sciences de l'éducation, l'article de Wickman et Ostman (2002) est particulièrement intéressant pour notre objectif, du fait qu'il propose une démarche potentiellement utilisable pour aborder les malentendus, et que celle-ci est utilisée pour aborder la question du changement conceptuel dans l'apprentissage des sciences en milieu scolaire, c'est-à-dire précisément notre problème. Les auteurs construisent à partir de l'approche socio-culturelle, du pragmatisme et des travaux du second Wittgentstein, une démarche d'analyse de la construction de sens ("meaning making") en milieu scolaire. Le but des auteurs consiste à "proposer un cadre théorique du mécanisme d'apprentissage au niveau discursif, qui peut traiter à la fois les aspects situationnels de l'apprentissage et le changement d'anciennes significations à la lumière de nouvelles expériences" [124].

Les auteurs partent du principe pragmatique [125] que l'on ne peut pas, dans une discussion particulière, tout questionner *à la fois*. Ils distinguent dès lors ce qui *reste* (that which "stands fast") des *écarts* (*"gaps"*) qui apparaissent dans la communication et que les auteurs identifient à partir de l'explicitation que les interlocuteurs comblent ultérieurement au cours de l'interaction [126], c'est-à-dire à partir des justifications, clarifications, explications et descriptions permettant de mieux se comprendre par la suite.

Cette approche se base donc sur les traces discursives produites lors de la suite de l'interaction pour définir ce qui est un *écart* (*"gap"*) : le concept d'*écart* de signification est dès lors proche du concept de *malentendu* utilisé en sciences du langage, et la démarche qui consiste à les identifier à partir de traces discursives subséquentes dans l'interaction est également similaire aux démarches des sciences du langage, que je vais aborder à présent. Je reviendrai donc sur cette démarche dans la prochaine section, et discuterai notamment du fait qu'elle présente l'inconvénient, pour l'objectif qui est le nôtre dans cette recherche, de renoncer à mettre en évidence les malentendus que les interlocuteurs ne remarquent pas eux-mêmes.

Au terme de cette brève discussion [127], il apparaît que de nombreuses recherches évoquent effectivement la question du malentendu en sciences de l'éducation ou en psychologie, et que c'est un phénomène dont les enjeux sont multiples et importants à plusieurs titres.

124. Traduit par l'auteur de l'anglais : "The purpose of this paper is accordingly to propose a theoretical framework of a mechanism of learning on a discursive level that can deal both with situational aspects and with continuous aspects of learning as a change of old meaning in light of new experiences.".
125. Pour la source de ce principe, voir Dewey (1938/1993).
126. Par exemple, les auteurs identifie un malentendu à partir d'une question comme "what do you mean ?"(Karlgren & Ramberg, 2012, p. 235).
127. Si je conviens volontiers du fait que ma discussion de la littérature demeure trop brève, ma recherche à travers la littérature des sciences de l'éducation m'a néanmoins conduit à en faire un examen bien plus vaste : j'ai simplement renoncé à faire la liste fastidieuse et peu intéressante pour le lecteur de ce que je n'ai, justement, pas trouvé, à savoir un cadre théorique en psychologie ou en sciences de l'éducation permettant d'identifier et d'analyser les malentendus.

Plus généralement, l'intérêt porté à la communication dans la construction des connaissances semble se renforcer au fil des décennies et constitue un point de convergence de plusieurs traditions distinctes dans la recherche actuelle. On le trouve déjà par exemple dans l'intérêt de Piaget à la *logique des significations* à la fin de son œuvre, il prend une place prioritaire dans les courants de recherche étudiant les interactions sociales et l'interlocution de l'approche socio-cognitive qui se sont développés par la suite (voir p. ex. : Gilly et al., 1999 ; Mercer, 1995 ; Perret-Clermont, 1979), apparaît en sémiotique (voir p. ex. : Grize, 1982 ; Lotman & Uspensky, 1978 ; Wertsch, 1989), et plus récemment dans la psychologie culturelle et l'approche socio-culturelle (voir p. ex. : Bruner, 1990, 1991a ; Hatano & Wertsch, 2001 ; Valsiner, 2007), et plus récemment encore dans l'approche dialogique se réclamant de Bakhtine (voir p. ex. : Ligorio & César, 2013 ; Marková, 2007 ; Mercer & Howe, 2012 ; Wells, 1999). Je reviendrai à la suite de ce chapitre sur ces approches pour en examiner les apports à la théorisation des processus d'apprentissage.

Cependant, concernant plus strictement le phénomène de malentendu, je n'y ai pas trouvé une conceptualisation ou théorisation que je puisse d'emblée reprendre pour mener mes analyses dans cette recherche. En conséquence, il me paraît indispensable de construire une nouvelle perspective, intégrant plusieurs approches issues de disciplines diverses, pour aborder mon objet d'étude.

3.1.3 Approches des sciences du langage

Les malentendus ont surtout fait l'objet de recherches en sciences du langage et de la communication, notamment en linguistique, psycholinguistique et en pragmatique (voir p.ex. : Sayer, 2013 ; Verdonik, 2010). Sans en faire un état de l'art [128], je discuterai quelques travaux de ces domaines, pour travailler à la définition de la notion de *malentendu*. Je tenterai de dégager de cette discussion quelques spécificités de l'étude des malentendus, et en particulier les problèmes que pose son opérationnalisation, les distinctions utiles, et des critères pour en guider l'analyse.

En sciences du langage, la question du malentendu est liée à celle de l'ambiguïté (voir p.ex. : Caron, 1983). La recherche dans ce domaine s'intéresse habituellement au malentendu comme un écueil dans le fonctionnement de la langue ou de la communication, ou comme un "échec" dans la communication. Je commence par discuter cette idée à l'aide de quelques travaux, dans la première section ci-dessous, pour ensuite aborder d'autres aspects du malentendu.

Certains travaux (voir p.ex. : Weizman, 1999) mettent l'accent sur la valeur ou l'utilité des situations de malentendu. Pichonnaz propose même un ouvrage titré *Le malentendu productif*, qui s'intéresse à la manière dont les supports photographiques permettent une production de sens au cours de procès juridiques. Cette approche met en exergue la dimension créative des situations de malentendu, que j'ai également évoquée en discutant de l'interprétation et de la coordination des points de vue (voir la discussion des échelons pertinents pour cette recherche). Lors de cette discussion, j'ai proposé l'idée que cette créativité relevait d'un processus de reprise avec variation, dans une rétro-action circulaire réciproque coextensive reposant sur le fait que, bien souvent, lorsque nous ne comprenons pas notre interlocuteur nous considérons

128. Pour une vue d'ensemble, voir par exemple Weigand (2017) ou sa review par Cooren (2018).

néanmoins avoir compris : cette dimension créative du phénomène de malentendu passe souvent inaperçue aux interlocuteurs, qui pensent en toute bonne foi avoir interprété ce qui leur a été dit sans en modifier le sens. J'aborderai ces malentendus qui passent inaperçus des interlocuteurs dans la seconde section ci-dessous.

Enfin, dans la troisième section ci-dessous, nous aborderons quelques distinctions en vue d'une définition du malentendu. Celle-ci est malaisée : aux difficultés d'observation des malentendus - en particulier lorsqu'ils passent inaperçus des interlocuteurs engagés dans la communication étudiée - s'ajoute la complexité du phénomène. Les sciences du langage offre néanmoins des repères pour construire une définition en psychologie, que je formule tout à la fin de ce chapitre (voir section 3.4.1, p. 222 et suivantes).

3.1.3.1 Le malentendu comme un acte de communication qui échoue

Bosco, Bucciarelli, et Bara (2006) étudient les *échecs de la communication* ("*communicative failure*") dans la perspective de la pragmatique cognitive : ils distinguent *malentendus* et *non-compréhension*. Lors d'un éventuel échec de la signification de l'acteur, la *non-compréhension* constitue le cas où l'interlocuteur ne comprend pas l'intention communicative - par exemple il reconnaît ne rien comprendre à ce que le locuteur exprime - alors que le *malentendu* constitue le cas où l'interlocuteur comprend autre chose que ce que le locuteur avait l'intention de communiquer, par exemple lorsqu'il interprète une requête comme une assertion sur l'état du monde [129].

Les auteurs distinguent également trois moments successifs dans le processus de communication où celle-ci peut échouer :

— l'*échec des actes d'expression* ("Failure of the expression act") qui est l'échec à la compréhension de la valeur expressive d'un acte (de langage) : le destinataire ne se rend pas même compte qu'on s'adresse à lui ou à elle ;

— l'*échec de la signification de l'acteur* ("Failure of the actor's meaning") a lieu dans un deuxième temps, du moment qu'il n'y pas d'échec de l'acte d'expression, avec cette fois un échec concernant la reconstruction du sens de l'acte tel qu'il est intentionné par la locutrice ou le locuteur ;

— l'*échec de l'effet communicatif* ("Failure of the communicative effect) a lieu en dernier, si l'acte communicatif n'a pas subi l'un des deux précédents échecs, et porte cette fois sur les effets désirés de l'acte communicatif : l'interlocuteur refusant d'adhérer à une proposition, de répondre à une question, etc. fait échouer l'acte quand bien même les intentions communicatives sont interprétées dans le sens voulu par la locutrice ou le locuteur.

Je retiens de cette typologie la distinction entre *non-compréhension* et *malentendu* pour les deux premiers échecs listés ci-dessus :

129. Les auteurs donnent l'exemple du Cyclope qui comprend la requête de Polyphème de l'aider dans sa vengeance comme l'assertion du fait qu'il est devenu aveugle par accident (p. 1405).

la non-compréhension est le cas où les actes de communication du locuteur ne conduisent à aucune construction de sens par l'interlocuteur - soit qu'ils ne sont pas perçus (échec des actes d'expression) soit que l'interlocuteur est conscient de n'avoir rien compris de ce qu'ils signifient et renoncent à leur donner du sens (échec de la signification de l'acteur) ;

le malentendu est le cas où les actes de communication du locuteur conduisent à une construction par l'interlocuteur qui est différente de ses intentions - soit parce que l'interlocuteur a perçu autre chose (échec des actes d'expression) [130], soit parce qu'il a reconstruit différemment le sens de ce qui a été exprimé (échec de la signification de l'acteur), notamment en fonction du contexte [131].

Par contre, le troisième échec listé par ces auteurs (l'*échec de l'effet communicatif*) n'entre pas dans le phénomène de malentendu à mon avis, car il s'agit plutôt de l'adhésion ou non de l'interlocuteur aux discours, voire d'un refus (partiel) de coopération, comme le signalent eux-mêmes les auteurs. Ils incluent néanmoins cette troisième catégorie de phénomène dans les échecs de communication en raison de leur définition : l'*échec* est défini par les auteurs à partir de la pragmatique des actes de langage, comme "une tentative infructueuse de produire l'effet voulu chez le partenaire" (Bosco et al., 2006, p. 1399).

Dans le cas de l'*échec de l'effet communicatif*, Bosco et al. (2006) distinguent entre un refus "fort" ou "faible" par l'interlocuteur de la proposition du locuteur. Cette catégorie soulève le problème de ce qui est souvent désigné dans le milieu scolaire comme la "bonne volonté" des élèves : acceptent-ils de faire la tâche demandée ? S'y engagent-ils comme l'enseignant le souhaiterait, ou d'une manière alternative (le "refus faible" cité ci-dessus) qui renégocie leur investissement et le travail attendu ? Que dire d'un élève qui refuse de travailler (le "refus fort" cité ci-dessus) : s'agit-il d'un malentendu sur la tâche à effectuer ? Ces questions sont particulièrement difficiles en milieu scolaire : il n'est souvent pas possible de distinguer entre *malentendu* (au sens défini ci-dessus) et négociation du travail à effectuer, c'est-à-dire négociation des *effets communicatifs*. J'adopterai donc une définition plus restrictive de l'échec, portant uniquement sur les deux premières phases listées ci-dessus (c.-à-d. *échec des actes d'expression* et *échec de la signification de l'acteur*).

La recherche empirique de Bosco et al. (2006) a pour but de valider la taxonomie et de déterminer quelles catégories d'échec sont les plus difficiles à reconnaître et à *réparer* ("*repair*"). Les chercheurs proposent une série d'exemples à des enfants de 3 à 8 ans dans un dispositif expérimental, et comptent les *réparations* effectuées par les participants (une nouvelle tentative après un premier acte communicatif est considéré comme une *réparation*). Les résultats mettent en évidence qu'il est plus difficile pour les enfants de reconnaître qu'une communication a échouée qu'il ne l'est de reconnaître qu'elle a réussie. L'*échec de la signification de l'acteur* est le plus difficile à reconnaître.

Cette distinction permet de spécifier notre objet de recherche : c'est le phénomène de *malentendu*, et tout particulièrement celui qui consiste en un *échec de la signification de l'acteur*, qui nous intéresse dans

130. Les auteurs donnent l'exemple d'un partenaire qui entend "sheep" au lieu de "ship" (p. 1405).
131. Pour prolonger l'exemple donné par les auteurs, on peut imaginer ici des divergences d'interprétation du terme "ship" selon le contexte qui font tantôt référence à un *navire* et tantôt à un *vaisseau spatial*, par exemple.

notre recherche, et tout particulièrement dans les situations où il n'est pas reconnu par les interlocuteurs. Le phénomène de non-compréhension est plus anecdotique pour nos objectifs centrés sur les processus d'apprentissage en milieu scolaire : il est en effet assez rare que les élèves ne se rendent pas compte que l'enseignant communique à leur adresse, puisqu'ils sont précisément à l'école pour recevoir ces actes de communication.

Bazzanella et Damiano (1999) spécifient cinq niveaux auxquels un malentendu peut apparaître :

1. Phonique.
2. Lexical.
3. Syntaxique.
4. Sémantique.
5. Pragmatique.

Il s'agit d'une taxonomie inspirées des catégories de la linguistique. Les auteurs précisent dans une note que catégoriser les malentendus selon cette taxonomie consiste en une simplification puisqu'un malentendu pourrait appartenir à plusieurs catégories. C'est dans la catégorie sémantique que se trouvent le plus de malentendu, selon cette taxonomie. Pour cette raison, elle ne nous fournit pas vraiment un cadre d'analyse des malentendus, puisque c'est justement à cette catégorie que nous nous intéressons. Or, même si elle peut encore être distinguée entre les malentendus portant sur un contenu propositionnel et ceux portant sur des expressions de références, notamment à des objets extérieurs au discours, cette catégorie reste trop vaste pour permettre une caractérisation du phénomène relativement aux apprentissages des élèves. En outre, la dimension cognitive des apprentissages ne saurait simplement se réduire ici au niveau "sémantique" à partir d'une catégorisation reposant uniquement sur des caractéristiques langagières des échanges, puisque le contexte fournit de nombreux éléments pertinents pour interpréter les significations des termes, ces interprétations ne pouvant *de facto* être reconstruites par le chercheur uniquement à partir de la sémantique.

Au terme de leur analyse, Bazzanella et Damiano (1999) proposent une autre taxonomie, basée sur la manière dont les interlocuteurs gèrent les malentendus dans la conversation. Ils distinguent quatre cas de figure :

— la *non-compréhension* ("non-understanding") ;
— le *malentendu* ("misunderstanding") ;
— la *compréhension* ("understanding") ;
— l'*approche d'une compréhension* ("coming to understanding").

Pour ces auteurs, une différence est marquée entre la *non-compréhension* d'une part, et les trois autres termes d'autre part : si la non-compréhension est une catégorie discrète, les trois autres sont considérées

comme des catégories continues, c'est-à-dire que les différences entre *malentendu* et *compréhension* d'une part, et entre *compréhension* et *approche d'une compréhension* d'autre part, sont des différences de degré. Pour ces auteurs, il n'y a pas "absence ou présence de compréhension" (Bazzanella & Damiano, 1999, p. 834). En ce sens, même les malentendus sont considérés comme participant au processus de construction d'une compréhension mutuelle entre les interlocuteurs. Comme ces auteurs étudient seulement des malentendus identifiés par les interlocuteurs, qui s'engagent à tenter de les réparer au fil de la conversation, les malentendus leur apparaissent sous un aspect positif : ils constituent finalement l'occasion d'éclaircissements, d'un travail vers une compréhension mutuelle plus étendue. Mais qu'en est-il des situations où les interlocuteurs ne se rendent pas compte qu'ils divergent quant au sens donné à un même discours ? Ce modèle théorique ne nous permet pas d'aborder cette question, mais il met en évidence l'importance de considérer le malentendu comme un moment dans le processus de construction d'une compréhension mutuelle dans les interactions orales, en montrant les multiples répétitions, reprises et nouvelles tentatives auxquelles les interlocuteurs recourent pour progressivement partager leur points de vue et vérifier la qualité de ce partage.

Pour cette recherche, je préfère également inclure la non-compréhension dans la définition de malentendu, quitte à renoncer à aborder le malentendu comme un phénomène toujours positif de permettant aux interlocuteurs de s'acheminer vers une compréhension mutuelle plus aboutie, pour deux raisons :

1. Premièrement, la définition du *malentendu* qui exclut les cas de *non-compréhension* ne fonctionne que pour les situations où les interlocuteurs repèrent eux-mêmes leurs divergences de sens au cours de l'interaction et s'engagent activement à réduire l'écart entre leurs compréhension respectives des propos, ce qui exclut nombre de cas intéressants des échanges écrits et des divergences qui passent inaperçues aux interlocuteurs.

2. Deuxièmement, la différence que font ces auteurs entre *non-compréhension* et *malentendu* est dans bien des cas une question de temps ; un *malentendu* qui n'est pas encore repéré est, à ce moment-là, une *non-compréhension* ; cette différence n'exclut pas pourtant que l'élaboration du *malentendu* qui suit ne s'opère justement sur le même sujet que la *non-compréhension* qui le précède, ce qui fait de cette distinction un artefact méthodologique : au final, c'est le moment choisi par le chercheur pour examiner les échanges qui est déterminant, ou encore les circonstances des échanges, selon qu'elles permettent ou non aux interlocuteurs d'élaborer leurs divergences pour avancer dans une compréhension mutuelle. Cela rend cette distinction peu maniable en milieu scolaire. En effet, une interaction ou conversation n'est, en fait, jamais terminée, et il arrive souvent qu'elle est interrompue dans le cadre des échanges en classe, pour être reprise plus tard. Nous ne pourrions donc jamais affirmer d'une *non-compréhension* qu'elle n'est pas un *malentendu*, ni décider entre les deux, puisqu'il est toujours possible qu'une non-compréhension soit identifiée bien plus tard par les interlocuteurs reprenant leur discussion, ce qui en fait derechef un *malentendu* selon ces définitions.

Les auteurs ont également cherché, à partir d'un corpus de malentendus identifiés par les interlocuteurs, ce qui a suscité les malentendus étudiés : les *déclencheurs* (*"triggers"*). Ces *déclencheurs* ne sont pas pour

autant considérés comme des causes et ne conduisent pas à des malentendus de manière déterministe, pour ces auteurs. Du point de vue méthodologique, cette recherche se concentre sur le processus de résolution des malentendus dans l'interaction. Bazzanella et Damiano (1999) nous apportent une piste intéressante en montrant que les interlocuteurs repèrent les malentendus à partir d'un indice, qui consiste souvent en un tour de parole apparemment inconsistant avec ce qui a été dit avant et/ou avec la *demande conversationnelle*[132] en général.

Cependant, dans cette recherche, seuls les malentendus repérés par les interlocuteurs sont étudiés. Hors, dans le contexte de l'apprentissage qui nous intéresse, ces malentendus qui passent inaperçus sont particulièrement intéressants. Par ailleurs, ils ne sont pas forcément moins nombreux que les malentendus identifiées par les interlocuteurs. Une recherche récente dans ce domaine (Galantucci & Roberts, 2014) montre que les incohérences dans la communication passent facilement inaperçues aux interlocuteurs, contrairement à ce qui est parfois présupposé par les chercheurs. Il est en effet plus probable que des malentendus ne donnant lieu à aucune élaboration future soient à même de rendre compte de certaines réponses erronées régulières que des malentendus que les interlocuteurs ont justement l'occasion de corriger à travers des justifications, clarifications etc. Nous pourrions nous baser sur cet indice d'inconsistance pour, peut-être, réussir à étudier des malentendus qui passent inaperçus.

3.1.3.2 Le malentendu dont les interlocuteurs n'ont pas conscience

Dascal (1985) est l'un des premiers auteurs à s'être intéressé au malentendu, montrant notamment qu'il fait partie intégrante du processus de compréhension. Dans son approche, le malentendu ne se réduit pas à un l'échec d'un acte de communication, ni aux cinq niveaux des phénomènes linguistiques précédemment cités : le malentendu est un risque toujours présent, de son point de vue, car il inclut dans son approche la problématique des inférences effectuées par les interlocuteurs pour interpréter les implicites de la communication.

Ainsi, Dascal (1999) en conclut :

> *The possibility of misunderstanding is ever present because not everything can be explicitly said, and the interlocutor must therefore rely on inferences based on fallible presumptions. Communication, that is, involves a lot of guesswork, and however 'educated' our guesses are, they can miss the mark. Weizman's analysis of the role of breaches of the 'given-new contract' in generating misunderstanding illustrates how such guesswork, even when based upon a structural communicative convention, can in fact be misleading.*
>
> *(Dascal, 1999, p. 755)*

Cet extrait reprend les résultats de Weizman (1999) pour souligner le fait que ce n'est pas seulement ce qui est explicitement dit - et rendu visible sous forme de tours de parole par le chercheur - qui est à l'origine de malentendus, mais également le *contrat de communication* ou tout *cadre conventionnel* de

132. Les auteurs citent Dascal, 1977.

conversation. Il ne suffit donc pas d'identifier une structure conversationnelle en 3 ou 4 tours de parole pour saisir le phénomène que nous souhaitons aborder à travers la notion de malentendu, ni d'analyser les discours explicites aux différents niveaux du fonctionnement de la langue (phonique, lexical, syntaxique, sémantique et pragmatique). Il s'agit de prendre également en considération les opérations cognitives des interlocuteurs lorsqu'ils tentent de deviner ("guess-work") - ou d'effectuer des inférences - quant à ce qui n'a justement pas été exprimé mais compte néanmoins, au moins comme "contexte" au "texte", ou plus généralement comme *situation d'interlocution* aux *discours*[133]. Cette problématique des "inférences" opérées par les interlocuteurs nous intéresse doublement :

— elle permet de mettre en évidence une activité cognitive des interlocuteurs effectuée *en situation*, lorsqu'ils sont engagés dans un processus de construction d'une compréhension mutuelle, qui va au-delà d'une maîtrise de la langue sur les plans lexical, syntaxique, sémantique etc. que cette recherche peut aborder comme un phénomène psychologique ;

— elle souligne l'importance d'une perspective situationnelle (voir la section sur le choix des échelons), car ces "inférences" ont notamment pour fonction de compléter le discours là où il demeure implicite (ou lacunaire) pour la construction d'une compréhension mutuelle, en se reposant sur des indices (matériels, sociaux, culturels, historiques) spécifiques à la situation de communication : c'est ouvrir le champ des recherches sur les malentendus à des traces non discursives, et à des malentendus qui ne sont pas identifiés comme tels dans les traces discursives des interlocuteurs.

Dans une discussion plus récente, Dascal (1999) se pose justement la question des malentendus que les interlocuteurs n'identifient pas eux-mêmes :

> *Second, how often is misunderstanding detected and corrected, without further damage to communication ? Here, current wisdom has it that most misunderstandings are detected immediately after occurrence (second turn), and successfully repaired in the third or fourth turn. Bazzanella and Damiano provide both examples and statistical data supporting this assumption. There are, of course, exceptions, where the misunderstanding persists for several turns, as illustrated by Bazzanella and Damiano's example (11), by Trognon and Saint-Dizier's tutorial dialogue, and by Weizman's fictional dialogue. Whereas in the former two cases the misunderstanding is finally resolved, in the last case it remains - at least ostensively - unresolved. It thus deserves the label miscommunication - also used by Weigand to indicate a breakdown in communication caused by sustained misunderstanding.*
>
> *(Dascal, 1999, p. 754)*

L'extrait cité ci-dessus met en évidence que les malentendus sont décrits par la plupart des auteurs comme une structure standard tenant en trois ou quatre tours de parole. Ces auteurs travaillent essentiellement sur des malentendus immédiatement repérés par les interlocuteurs. En effet, les chercheurs se basent sur cette structure conversationnelle standard pour identifier des malentendus dans un corpus, et ne peuvent par conséquent identifier des malentendus à des moments de la conversation où ils passeraient inaperçus aux interlocuteurs et qui ne feraient pas l'objet d'une mise en discours.

133. Ce sont les termes que j'utiliserai plus loin, en suivant la terminologie de Grize (1996).

Pour Dascal, même les malentendus qui ne sont pas réparés pose problème, et justifie l'introduction d'une distinction entre *malentendu* et *malcommunication*, qui permet de réserver le terme *malentendu* ("misunderstanding") aux échanges où les interlocuteurs parviennent à résoudre le malentendu en quelques tours de parole, alors que les cas non résolus sont dénommés *malcommunication* ("miscommunication"). Si Dascal se pose également la question des malentendus qui ne sont pas repérés par les interlocuteurs, il n'y répond pas, et la précédente distinction pourrait laisser penser qu'il ne s'agit pas du même phénomène et qu'il faudrait encore introduire une nouvelle distinction terminologique. Plus généralement, ces malentendus non repérés ne semblent pratiquement jamais faire l'objet d'analyse en sciences du langage.

L'analyse de Trognon et Saint-Dizier (1999) fait figure d'exception à cette remarque générale, puisqu'ils parviennent à montrer un malentendu que les interlocuteurs n'ont pas *immédiatement* repéré. Or, ces auteurs utilisent justement un cadre d'analyse visant à inclure la dimension cognitive dans le travail d'analyse : la *Logique Interlocutoire*. Trognon et Saint-Dizier (1999) parviennent notamment à montrer que dans un dialogue dont le but est l'acquisition des savoirs "ce sont les contenus propositionnels des actes de langage agencés dans un dialogue tutoriel qui cimentent sa structure" (*idem,* p. 789). Autrement dit, ces auteurs montrent qu'il est indispensable pour l'analyse de prendre en compte la dimension cognitive des échanges - abordé par la *Logique Interlocutoire* comme un "contenu propositionnel" - pour reconstruire la structure conversationnelle du malentendu. L'approche de ces auteurs non seulement élargit le champ de recherche sur les malentendus à des phénomènes plus diversifiés et encore largement inexplorés, mais elle remet également en question la structure standard du malentendu - en trois ou quatre tours de parole - telle qu'on l'a trouve dans théorie de l'organisation conversationnelle de l'Analyse Conversationnelle. Cette théorie a décrit les procédures réparatoires directement subséquentes à l'identification d'une difficulté par les interlocuteurs :

> *Ces procédures réparatoires sont maintenant bien connues. Elles sont initiées soit au cours du tour de parole dans lequel apparaît la difficulté, comme lorsque le locuteur actuel arrête le déroulement de son discours avant de terminer son tour ou juste après, soit dans le tour suivant par un interlocuteur qui trouverait pertinent d'intervenir, soit encore, en troisième position par le locuteur qui est à la source du trouble.*
>
> *(Trognon & Saint-Dizier, 1999, p. 804)*

Si du point de vue conversationnel il y a une forte raison de procéder séquentiellement et de considérer que ce qui suit un tour de parole y est lié, du point de vue cognitif cette séquentialité n'est pas la seule dimension pertinente. En effet, pour pouvoir rendre compte des apprentissages il paraît nécessaire d'ouvrir l'analyse à des interruptions, comme par exemple lorsque la conversation change de sujet ou s'oriente sur un aspect spécifique, de telle sorte qu'il n'y a pas forcément une continuité sur le plan cognitif entre des tours de parole immédiatement successifs, et de telle sorte que les interlocuteurs peuvent reprendre plus tard le fil de leur conversation sur le sujet précédent - comme s'ils "fermaient une parenthèse" ou effectuaient un saut rétroactif - car la pensée reprend très fréquemment une conversation ancienne, sans s'embarrasser du temps écoulé. C'est ce que montrent Trognon et Saint-Dizier (1999) dans leur analyse, où des "contenus propositionnels" peuvent être repris et faire l'objet de clarifications subséquentes après une

dizaine de tours de parole passés sur d'autres "contenus" [134].Bousquet (1996) considèrent aussi qu'il s'agit de *malentendu* lorsqu'il y a "illusion de compréhension" (Hérédia-Déprez, 1986, cité par Bousquet, 1996) et que la négociation de sens est reportée à plus tard, ou n'a jamais lieu, notamment lorsque la divergence d'interprétation n'a justement pas été repérée par les interlocuteurs. La *Logique Interlocutoire* permet de mettre en évidence de tels sauts ou interruptions en établissant une *hiérarchie conversationnelle*, que l'analyste infère à partir de la *réussite* et de la *satisfaction* des *actes de langage*, ce qui nécessite notamment de s'intéresser au *contenu propositionnel* de tels actes. De cette manière, l'analyste peut aborder la dimension cognitive de la conversation en lui attribuant une part de responsabilité dans la construction des structures de la conversation. Intégrer cette dimension cognitive me paraît indispensable à une démarche d'analyse qui ne souhaite pas se limiter à l'identification de malentendu ponctuel, qu'imposerait une définition qui restreint le malentendu à une structure conversationnelle en 3-4 tours de parole consécutifs.

Pour l'étude des situations de malentendu dans l'apprentissage de la physique en milieu scolaire, il me paraît désormais nécessaire d'étendre le concept de *malentendu* défini en sciences du langage, car s'il devait se limiter à des malentendus (1) repérés par les interlocuteurs et (2) faisant l'objet d'une réparation explicite (3) en quelques tours de parole seulement, je ne sélectionnerais que de rares cas dont les liens avec les processus d'apprentissage risque, de plus, de rester anecdotiques. En effet, les situations de malentendu m'intéressent d'autant plus, relativement aux processus d'apprentissage escomptés en milieu scolaire, (1) qu'elles passent inaperçues des interlocuteurs et/ou (2) reposent sur des implicites et (3) s'étendent sur une longue durée, celle-ci ayant plus probablement des effets sur l'appropriation par les élèves des savoirs enseignés.

En outre, les recherches citées ci-dessus opèrent sur des traces comprenant quelques tours de parole, voire jusqu'à quelques minutes d'interaction ; si l'on veut aborder la construction des connaissances dans un échelon temporel de l'ordre de la séquence d'enseignement [135], la *focale* de notre perspective change forcément aussi de finesse : plutôt qu'une définition stricte comme celle de Dascal ci-dessus, je privilégierai une définition large permettant d'identifier des phénomènes plus variés sur la forme, afin d'obtenir une large palette de phénomènes, et d'en spécifier éventuellement les caractéristiques spécifiques après l'analyse.

3.1.3.3 Le malentendu : distinctions et définitions

Après avoir parcouru quelques questions émergeant des recherches portant sur le malentendu, tentons à présent d'aborder sa définition. Comment ces auteurs procèdent-ils pour définir le malentendu ?

134. On imagine facilement le même phénomène au niveau de la pensée d'un individu, qui reprend le fil de sa pensée parfois plusieurs années plus tard. Évidemment, la reprise d'une conversation des années plus tard pose un véritable défi en termes d'observations scientifiques. Néanmoins, il n'est pas difficile de trouver des illustrations de ce phénomène dans sa propre vie, dont nous avons justement une conscience permettant, dans certains cas, de se rendre compte de telles reprises sur le plan cognitif. Cependant, cette réflexion a conduit de nombreux chercheurs à élaborer une théorie du *Dialogical Self*, à partir de la théorie du développement de Vygotski où cette hypothèse d'un dialogue intérieur constitutif de la pensée a pris forme il y a près d'un siècle. Nous reviendrons sur ce lien à une prochaine section de ce chapitre (section 3.2.10, p. 149).

135. Ce qui correspond au temps du calendrier de près de 5 mois pour notre recherche, et à une durée de quelques 50 heures de travail en classe.

Weigand (1999) tente d'établir une définition du malentendu en partant des divers cas de figure rencontrés dans la littérature. L'objectif de Weigand (1999) est de définir le malentendu *standard* ou, autrement dit, le cas le plus courant. L'auteure commence par faire une liste des divers malentendus abordés dans la littérature de sociolinguistique et d'analyse des discours. Elle répertorie cinq cas de figure :

1. Les *malentendus interculturels* ("cross-cultural"), apparaissant entre interlocuteurs appartenant à des cultures différentes et cela même s'ils partagent la même langue maternelle. Cette catégorie inclut parfois la communication entre les genres, voire même entre des milieux différents au sein d'une même communauté.

2. Les *malentendus planifiés* ou *délibérés*, visant à tromper l'interlocuteur à dessein.

3. La *non-compréhension* ou *les difficultés de compréhension*, qui ne sont justement pas considérés comme des malentendus par Weigand (1999) [136].

4. Les *échecs de la communication* ou *malcommunication* ("miscommunication"), dont la définition dépend largement du cadre théorique adopté, et qui apparaissent plus courants que les réussites dans bien des approches. La question de l'échec et de la réussite de la communication pose également le problème de leur distinction dans l'analyse, où échecs et réussites paraissent inséparables selon Weigand (1999), en tout cas pour qui s'en tient strictement à l'étude des performances langagières. Quant aux explications du fonctionnement du langage, elles se reposent plutôt sur une idée dynamique exprimée en anglais par la notion de *coming to an understanding*.

5. Les *erreurs de communication*, parmi lesquelles Weigand (1999) cite le phénomène de la langue qui fourche, des erreurs d'écoute, ou encore des erreurs pragmatiques (erreurs d'inférence dans l'application des maximes de Grice). L'auteure, cependant, considère la notion d'*erreur* comme inadaptée à la discussion des malentendus, puisqu'elle assume une attribution à l'auditeur ou au locuteur de la responsabilité de l'échec plutôt qu'à une structure conversationnelle, sans pour autant mener d'enquête sur cette question.

Weigand (1999) conclut de cette liste de cas de figure qu'elle est hétérogène, et ne constitue donc pas une typologie avec laquelle nous pourrions classer les malentendus rencontrés. En effet, aucun critère ne permet de rendre compte de sa construction : les *malentendus interculturels* sont regroupés plutôt en fonction d'une analyse des origines du malentendu, alors que les *malentendus planifiés* soulèvent la question de l'intention et de la conscience du malentendu pour au moins un interlocuteur, et que les trois dernières catégories font plutôt référence à des critères linguistiques, quoique ceux-ci ne sont pas non plus clairement exposés, du fait d'une multiplicité de cadres théoriques de référence (grammaire générative, pragmatique conversationnelle, etc.) qu'il est difficile d'articuler les uns avec les autres (voir aussi à ce sujet : Cooren, 2018).

136. Voir la discussion de ce terme dans la section précédente.

À partir de ce constat, Weigand (1999) propose de s'intéresser au "cas standard" (*idem*, p. 768) plutôt que de procéder à partir de la diversité des cas de figure étudiés. Elle part alors de la définition de la *compréhension* de Schegloff pour définir un cas standard de malentendu, par les cinq points suivants :

> *Therefore, let us try to define some constitutive features of what might be called the standard case of misunderstanding :*
>
> - *Misunderstanding is a form of understanding which is partially or totally deviant from what the speaker intended to communicate. As a form of understanding, it refers to the reverse side of meaning or to the reverse side of the utterance, and represents a cognitive phenomenon belonging to the interlocutor.*
> - *The interlocutor who misunderstands is not aware of it. Remember Goethe in Die Wahlverwandtschaften : "Niemand würde viel in Gesellschaften sprechen, wenn er sich bewusst wäre, wie oft er die anderen missversteht"*[137].
> - *Misunderstanding cannot be considered as a cognitive act because the hearer is not aware of it ; instead, it represents an ability or inability of the hearer or, as Baker and Hacker (1980 : 617) would prefer to say, it "is akin to an ability".*
> - *Misunderstanding will normally be corrected in the course of the ongoing dialogic action game. We may be confident that we will arrive at an understanding in the dialogic action game as a whole even if an utterance has been misunderstood.*
> - *Meaning and understanding or misunderstanding an utterance is not an autonomous unit by itself but a part of the dialogic interaction. It is because of the general Dialogic Principle that language use can tolerate cases of misunderstanding.*
>
> *(Weigand, 1999, pp. 769-770)*

Ces cinq points fournissent une définition. Celle-ci nécessite néanmoins une discussion pour le projet qui est le nôtre dans cette recherche, au cours de laquelle je tenterai de montrer pourquoi je ne peux simplement reprendre cette définition et l'utiliser telle quelle.

Les deux premiers points sont particulièrement intéressants : ils mettent d'emblée en évidence la nécessité d'une approche interdisciplinaire pour étudier le malentendu ("... a cognitive phenomenon belonging to the interlocutor"). Vu depuis les sciences du langage, le malentendu apparaît comme un "phénomène cognitif appartenant à l'interlocuteur", alors qu'en psychologie on aurait justement plutôt l'impression d'être confronté à une phénomène langagier. C'est le propre d'un objet d'étude qui reste insaisissable dans les limites d'une approche monodisciplinaire.

Une première conséquence de cette difficulté peut être observée dans la définition même que fournit Weigand : alors qu'elle construit une définition en sciences du langage, elle s'engage à plusieurs reprises dans

137. "Personne ne parlerait beaucoup en société, s'il était conscient combien souvent les autres le comprennent mal" (traduit par l'auteur).

des attributions d'ordre psychologique qui, puisque ce n'est pas son domaine de recherche, apparaissent un peu naïves au psychologue :

— le phénomène cognitif ("cognitive phenomenon") est d'emblée considéré comme individuel ("belonging to the interlocutor"), alors que j'ai justement argumenté en introduction à cette recherche l'importance des processus sociaux pour l'étude de la cognition, et nous y reviendrons encore dans la suite du chapitre ;

— le phénomène cognitif semble réduit à la pensée consciente des individus ("misunderstanding cannot be considered as a cognitive act because the hearer is not aware of it"), alors qu'il est largement reconnu en sciences cognitives que la vaste majorité de notre pensée est inconsciente ;

— le phénomène cognitif semble réduit à des habiletés de l'auditeur ("it represents an ability or inability of the hearer"), alors que j'ai justement tenté de montrer l'importance de processus singulier qui, dans certaines situations, permettent à un individu de comprendre alors que dans d'autres situations il échoue : c'est toute la psychologie sociale portant sur les processus d'influence, et sur l'effet des conditions sociales sur les performances (voir p.ex. : Monteil & Huguet, 1991) qui manque d'être prise en compte ici.

Sur ces points, je prendrai distance avec les positions de l'auteure, tout en m'accordant avec les liens qu'elle établit justement avec une approche psychologique du malentendu : seulement, au lieu d'attribuer la part psychologique ou cognitive du phénomène de malentendu à un individu ou à ses habilités, nous discuterons de ce point au fil des enquêtes menées dans cette recherche pour chaque situation de malentendu, singulièrement.

L'auteure relève d'ailleurs elle-même les limites de la référence aux compétences des interlocuteurs, en déclarant que cette attribution ne fonctionne que si l'on restreint sa recherche au cadre disciplinaire des sciences du langage :

> *As long as we consider linguistic means only, we might not be troubled by this assumption : the conventions of standard language use are valid for both interlocutors on the basis of their communicative competence.*
>
> *(Weigand, 1999, p. 769)*

En outre, les deux derniers points de la définition de Weigand citée ci-dessus font plutôt figure d'un *credo* : c'est un principe méthodologique généreux qui consiste, pour le chercheur, à *croire* que le malentendu portant sur une intervention ("an utterance") finira par être repéré et réparé par les interlocuteurs. Deux remarques s'imposent sur ce point, relativement à notre projet et ses spécificités :

— dans la réalité des échanges d'une classe au sujet des savoirs enseignés, le principe méthodologique adopté par les auteurs des sciences du langage pour étudier des conversations - dont l'objectif est rarement l'acquisition de nouvelles connaissances pour les interlocuteurs - paraît trop généreux :

ce serait assumer qu'en fin de scolarité tous les élèves auraient finalement acquis tous les savoirs effectivement enseignés, or on sait bien que ce n'est pas le cas ;

— la focale de la perspective des sciences du langage dans son traitement des malentendus comme portant spécifiquement sur une intervention ("an utterance") est sans doute trop fine pour permettre une étude des malentendus circulant en milieu scolaire, ceux-ci pouvant sans autre se disperser sur de nombreuses interventions, orales ou écrites, et dans une temporalité largement plus étendue que celles abordées dans les études examinées par Weigand.

Moyennant ces deux remarques supplémentaire, je peux reprendre la définition de Weigand pour proposer une articulation avec la démarche de recherche de cette étude, où les ancrages en psychologie cités ci-dessus sont repris sous la forme ouverte de questions (de recherche) [138] :

Question I : La dimension cognitive du phénomène de malentendu se réduit-elle toujours à des habiletés individuelles, ou peut-elle s'expliquer, selon les cas, par des processus sociaux (ou autres) ?

Question II : Une approche interdisciplinaire permet-elle l'identification et l'analyse de malentendus passant inaperçus à tous les interlocuteurs engagés dans la communication étudiée ?

Question III : Y a-t-il des conditions dans lesquelles la communication conduit un interlocuteur dans une situation de malentendu alors qu'elle réussit dans d'autres conditions pour le même individu ?

La définition des malentendus de Weigand (1999) met également en évidence que la compréhension mutuelle ne peut pas être prise pour une condition préalable à la communication, mais qu'elle se construit au fil d'*un jeu d'action dialogique* et qu'elle demeure toujours partiellement inachevée. Il nous reste à savoir comment, dans ce jeu dialogique, parvenir à décrire et définir des malentendus en articulant non seulement les éléments linguistiques tel que les risques de malentendu liés à la fonction de référence, aux moyens linguistiques, aux compétences des interlocuteurs mais aussi aux processus cognitifs de construction du sens (inférences, etc.) que les interlocuteurs donnent aux significations qui circulent dans l'échange. Ces processus cognitifs dépendent évidemment des contenus : ainsi, dans le contexte scolaire des classes orientées vers l'acquisition de connaissances en physique, les spécificités des savoirs enseignés méritent une place que les sciences du langage n'ont pas l'habitude de donner aux spécificités du sujet de conversation, traitant souvent de conversations ordinaires, d'extraits de roman ou de films.

En plus d'une définition invitant au travail interdisciplinaire, Weigand (1999) propose des distinctions utiles pour l'étude des malentendus. Elle distingue par exemple les malentendus qui portent sur les *moyens*("means"), et ceux qui portent sur les *buts* ("purpose") de la communication. Parmi les moyens, elle cite des moyens linguistiques, des moyens perceptifs - par exemple lors de la désignation avec un geste - , des moyens cognitifs tels que les connaissances nécessaires aux inférences pertinentes. Parmi les buts de la communication, elle distingue la *fonction liée à l'action* - par exemple établir un fait ou faire un reproche

138. Je réponds à ces questions sur la base des analyses effectuées dans cette recherche à la section 7.1, page 675.

- de la *fonction de référence* qui consiste à désigner un référent par un signe, et la *fonction prédicative*, qui consiste à dire quelque chose au sujet du monde, pour laquelle l'usage du lexique fournit le principal indice de malentendu selon Weigand (1999).

Ces distinctions visent à caractériser les malentendus en relation aux compétences utilisées par les interlocuteurs. Quoique située à un échelon individuel, la dimension cognitive est reléguée à la notion de compétence puisque Weigand (1999) n'aborde pas la signification et le sens élaboré par chaque interlocuteur pour définir les malentendus en référence à un contenu particulier, cherchant plutôt à le définir en référence à divers *types de* compétences qui les informe sur le fonctionnement général de la communication.

De nombreux auteurs de la pragmatique abordent les malentendus en cherchant à montrer que l'identification et la réparation conversationnelles des malentendus font partie des compétences des interlocuteurs. Par exemple, McRoy (1995) propose un modèle de la négociation conversationnelle autour de situation de malentendu par un processus d'abduction. House, Kasper, et Ross (2003) présente une approche un peu plus interdisciplinaire des malentendus, à partir de travaux fondateurs comme ceux de Dascal et Schegloff. Ils présentent quelques taxonomies des malentendus à partir d'analyses conversationnelles, dont celle de Weigand (1999) discutée ci-dessus, mettent en évidence le versant cognitif du malentendu et soulignent le fait que le malentendu n'est pas identifié comme tel par les interlocuteurs :

> *Misunderstanding is a form of understanding which is* partially or totally deviant *from what the speaker intended to communicate.*
>
> *As a form of understanding, it refers to the reverse side of meaning or to the reverse side of the utterance, and represents a cognitive phenomenon belonging to the interlocutor.*
>
> *The interlocutor who misunderstand is not aware of it (p. 769, italics in original).*
>
> *(House et al., 2003, p. 5)*

Ces auteurs définissent cependant aussi le malentendu comme un événement *individuel*, ce que je ne peux reprendre tel quel dans une recherche où je cherche également à mettre en évidence des processus interindividuels, sociaux et culturels à partir de l'analyse de malentendus en classe.Si ces travaux peuvent nous aider à réfléchir aux compétences nécessaires pour réussir à identifier et résoudre des malentendus, ils ne nous fournissent pas pour autant le cadre d'analyse nous permettant d'étudier les situations de malentendu en milieu scolaire d'une manière qui puisse contribuer à l'explication des processus d'apprentissage ou d'appropriation d'objets de savoir précis et identifiés par les chercheurs. En effet, une telle étude nécessite de laisser ouvert la question de savoir s'il s'agit, pour une situation particulière de malentendu, d'un manque de compétence d'un interlocuteur ou si d'autres explications permettent de rendre compte des divergences entre les points de vue. Dans ce but, notre cadre théorique interdisciplinaire devrait nous équiper à une articulation entre langage et cognitif qui traite distinctement les contenus échangés, les perspectives des interlocuteurs, et les structures conversationnelles ou autres caractéristiques propres à la communication elle-même.

Ce bref examen des travaux de sciences du langage portant sur le malentendu ne nous fournit pas un cadre théorique permettant son étude empirique, notamment parce qu'il s'agit d'une phénomène nécessitant une approche interdisciplinaire. Il permet néanmoins de mettre en évidence quelques idées largement acceptées par les auteurs travaillant sur le malentendu en sciences du langage :

— il existe une certaine structure conversationnelle, ou plus généralement une forme propre au malentendu et qui permettrait de le caractériser, voire de faire une typologie de ses variantes [139] ;

— le malentendu a été repéré par au moins l'un des interlocuteurs, alors que l'autre, selon les cas, ne s'en rend pas compte ou à l'autre extrême conduit volontairement son interlocuteur dans un malentendu (les *malentendus planifiés*) ;

— lorsqu'un interlocuteur ne comprend *rien* ou qu'il ne remarque pas qu'on lui adresse la parole, il ne s'agit pas de *malentendu* mais de *non compréhension* : le terme *malentendu* est généralement réservé aux situations où l'interlocuteur comprend autre chose et ne s'étend pas aux cas extrêmes où il n'a rien entendu, que ce soit à défaut d'y prêter attention ou pour d'autres raisons (il ne maîtrise pas la langue utilisée, ne s'identifie pas comme destinataire de la communication, etc.).

Ces éléments permettent de délimiter le phénomène du malentendu. Je reprends les deux premiers pour cette recherche, mais pas le troisième parce que les cas de malentendu non repérés me paraissent particulièrement intéressant à étudier si nous parvenons à nous doter d'un cadre théorique et d'une démarche d'analyse pour les identifier dans notre corpus. Les sciences du langage y renoncent d'ailleurs justement pour des raisons disciplinaires - leur objet d'étude étant la forme et les usages de la langue - et non parce que le malentendu, en tant que phénomène, ne comprendrait pas des cas qui passent inaperçus à tous les interlocuteurs concernés.

De plus, inclure les malentendus qui ne sont pas repérés par les interlocuteurs dans le champ d'investigation devrait nous aider à contribuer à éclaircir les processus de construction d'une compréhension mutuelle entre les interlocuteurs, et c'est dans ce but que cette recherche s'intéresse au phénomène de malentendu. C'est sur cette même idée que Weigand (1999) termine son article, en citant Dascal :

> *Thus we agree with Dascal (1985a : 442) : " A significant part of understanding speech has to do with misunderstanding ".*
>
> *(Weigand, 1999, p. 783)*

Il ressort de ce bref parcours en sciences du langage que le phénomène de malentendu est au cœur du processus d'intercompréhension, émergeant toujours à divers moments et à divers degrés au cours du processus, qu'il donne lieu à des procédures réparatoires bien connues mais que l'étude de l'occurrence de malentendu passant inaperçu des interlocuteurs dans divers milieux est non seulement rare, mais nécessite également une démarche d'analyse nouvelle qui reste à inventer.

139. Actuellement, ce sont surtout les procédures réparatoires, mises en œuvre par les interlocuteur dans des interactions orales à la suite d'un malentendu, qui ont fait l'objet de descriptions formelles ; la forme standard du malentendu est loin de faire l'objet d'un consensus.

3.2 Approches de l'apprentissage

Cette section évoque diverses approches de l'apprentissage, sélectionnées dans le but de fournir une définition prenant en compte les multiples dimensions constitutives de la pensée humaine. L'objectif consiste précisément à éviter le réductionnisme des premières théories globalisantes de la psychologie - comme le *behaviorisme* - qui tentaient de ramener tous les processus d'apprentissage à un seul mécanisme, et d'éviter aussi la candeur - plus courante dans la littérature contemporaine - qui consiste à se passer de toute définition, reléguant tantôt l'apprentissage à une *transmission d'information*, tantôt à des *compétences* ou *capacités* individuelles dont on se garde bien de dire en quoi elles consistent, ou encore en repartant de zéro dans la théorisation de l'apprentissage sous prétexte de l'ancrage dans une nouvelle discipline de recherche, comme les neurosciences.

Plutôt qu'une définition verbale tentant de saisir dans une phrase la complexité de l'apprentissage, cette section fait office de définition en évoquant une sélection de travaux théoriques et empiriques permettant de montrer, justement, cette complexité, et qui fournit à cette recherche le vocabulaire conceptuel nécessaire à décrire ce que la partie empirique du travail permettra d'observer. En outre, pour que les concepts puissent être mobilisés ensemble et fournir un cadre théorique qui rende visible les processus d'apprentissage, j'ai choisi les approches évoquées ci-dessous pour leur compatibilité - elles proviennent souvent d'une même filiation historique - et pour leur complémentarité - en visant à l'économie, je n'ai inclus de nouvelles théorisations que dans la mesure où elles amènent effectivement quelque chose de nouveau au phénomène de l'apprentissage du fait du regard qu'elles y portent. Ainsi, certaines théories sont délibérément laissées de côté par incompatibilité des fondements épistémologiques [140], alors que d'autres manquent sans doute en raison de mon exploration incontestablement limitée de la littérature, ce dont je m'excuse par avance.

Je présente les approches dans un ordre vaguement historique, pour procéder à partir d'éléments fondamentaux inclus dans les approches subséquentes, même si ce n'est pas toujours possible puisque plusieurs des approches citées sont apparues en parallèle, et souvent en interaction les unes avec les autres. Le but du propos étant de schématiser la complexité des processus d'apprentissage, je cherche uniquement à montrer successivement plusieurs "couches" à cette complexité en évoquant ces approches, de telle sorte que la coordination proposée consiste tantôt à se déplacer dans les échelons du phénomène étudié, tantôt à enrichir la perspective en se plaçant sous d'autres angles de vue et en construisant de nouvelles orientations du regard porté sur l'apprentissage.

Avant d'aborder des approches plus spécifiques, j'aimerais citer des travaux classiques de psychologie qui en constituent non seulement les fondements dans bien des cas, mais qui m'ont également fourni des concepts et que j'intègre à la perspective adoptée dans cette recherche. En particulier, je ne saurais

140. Je n'ai pas pu, par exemple, mélanger un modèle mécaniste comme l'exprime par exemple Johnson-Laird (2006) ou les nombreux modèles issus d'analyses statistiques, avec la psychologie organique de Baldwin, Wallon ou Piaget, car là où les uns voient des "déterminants" ou "facteurs" pensés comme des causalités simples et linéaires qui s'additionnent ou interfèrent entre elles, les autres perçoivent des processus rétro-actifs constitutifs d'une réalité psychique, sociale et biologique qui prend son origine dans l'interaction même entre les individus, et entre les individus et leur milieu. Il s'agit, à mon humble avis, d'approches incommensurables (pour une discussion plus détaillée de ce problème, voir l'excellent texte de Lewin, 1931) qui ne se coordonnent pas comme je tente de le faire pour celles que j'ai choisies.

diminuer l'importance de l'*épistémologie génétique* (pour une synthèse, voir : Piaget, 1964) et du *regard psychosocial* (Moscovici, 1984, p. 7) dans ma manière d'aborder les traces et dans l'interprétation des situations de malentendu.

Parmi les approches présentées par la suite, se trouvent les multiples travaux de recherche ayant contribué à montrer que l'apprentissage ne peut être étudié sans prendre en considération ses dimensions sociales, culturelles, historiques et matérielles. À commencer par l'approche socio-génétique et ses célèbres travaux sur le *conflit socio-cognitif*, j'aborde quelques approches [141] permettant de montrer les multiples dimensions de l'apprentissage, et l'importance de l'étudier comme un processus situé selon toutes ces dimensions à la fois. La section suivante est dédiée à l'explication de l'approche de Grize, qui m'a permis d'établir ces liens coordonnant l'ensemble présenté ci-dessous.

3.2.1 Ancrage en épistémologie génétique et en psychologie (micro)génétique

L'épistémologie génétique a permis de montrer que les grandes catégories de la pensée - que Piaget reprend de Kant (1993/1787) - se construisent au fil de l'ontogenèse de l'être humain, en interaction avec son milieu (physique, social, etc.). Quoique discrète, il s'agit d'une critique du rationalisme kantien [142] puisque l'épistémologie génétique vise à établir, en faisant de l'épistémologie une science empirique, le *constructivisme* et *l'interactionnisme - symbolique*, ajoutera-t-on [143] à la suite de Mead (1934), notamment. Si j'évoque ces travaux ici, c'est pour dire que cette recherche n'aurait pas été possible sans ce résultat de l'épistémologie génétique : la pensée, jusqu'à ses catégories (comme la causalité, le temps, etc.), est construite par chaque individu en interaction avec son milieu. C'est aussi assumer l'importance de chaque personne, procédant d'une construction qualitativement unique au monde, et l'importance du milieu dans lequel un être humain se développe, qui est constitutif de cette construction qualitativement unique. C'est sur ces fondements que je m'intéresse au milieu scolaire et que je cherche à mieux comprendre ce qui se passe dans cette interaction créative entre personnes et milieu au moment où elles forment leur pensée (en physique newtonienne).

Un autre apport essentiel subséquent à l'épistémologie génétique provient des travaux de psychologie, qu'il convient plutôt d'attribuer à l'œuvre d'Inhelder (voir p.ex. : Zazzo, 1993). Si Piaget était focalisé sur les grandes catégories de la pensée, à un haut niveau d'abstraction, pour pouvoir trancher la question philosophique "qu'est-ce que la connaissance humaine ?", son travail a néanmoins produit nombre d'outils permettant d'aborder la pensée réelle à condition d'adopter une perspective *en psychologie* plutôt qu'*en épistémologie* (voir à ce sujet Inhelder & de Caprona, 1992). Au cours des recherches de l'équipe piagétienne, les processus généraux abstraits par Piaget pour adresser la question de la connaissance humaine

141. Le rapide aperçu présenté ici est malheureusement loin d'être complet.
142. Et de Descartes, dont Piaget (1967b) rejette la "*causa seu ratio*" (p. 767), principe du rationalisme, et l'idée même des catégorie *a priori* chez Kant.
143. À mon humble avis, il est tout à fait possible de lire Piaget dans ce sens, à partir du moment où l'on considère les signes et symboles, la culture tout entière, comme faisant partie de ce qu'il nomme *milieu* ; cette dimension reste seulement implicite dans nombre de ses écrits, sans être ni rejetée ni véritablement oubliée, vu les importants travaux sur la *fonction sémiotique* (voir p.ex. : Piaget, 1945/1978).

en général, ont été mobilisés par ses collaboratrices et collaborateurs dans de nouvelles formes de recherche *en psychologie*, dont voici quelques exemples que j'utiliserai :

— le processus d'*adaptation* de la personne à son milieu, par *assimilation* du milieu au connu et par *accommodation* des connaissances au milieu ;

— les processus de *différenciation progressive* et d'*extension ou généralisation du champ d'application*, qui rendent compte du développement des connaissances humaines [144], autant pour un individu que pour le cours de l'histoire des idées dans certains cas ;

— le processus d'*abstraction*, comprenant une distinction nouvelle entre *abstraction simple* et *abstraction réfléchissante* ;

— la *décentration* et la *coordination des points de vue*, dont les travaux [145] constituent l'un des fondements de cette recherche, puisque la pertinence du phénomène des malentendus m'est apparue en examinant la question de la coordination des points de vue des élèves et de l'enseignant ;

— le *cercle sujet-objet* que Piaget utilise pour faire référence au fait que le sujet ne peut connaître quoique ce soit sans agir sur les objets dont il construit des connaissances, ni même se connaître sans prendre un objet [146], voire faire de lui-même un *objet* au sens d'un *objet d'étude*, et qui permet de montrer que l'épistémologie génétique repose sur une *logique dialectique* (Jalley, 2006) que je reprends également comme une alternative à la logique des causalités simples qui consiste à identifier de facteurs pour ensuite les recomposer ;

— le concept de *totalité*, développé notamment par la Gestalt Theorie, est également important en lien avec le point précédent, puisqu'il permet de rendre compte du fait que le chercheur perd quelque chose de vue au moment où il découpe par exemple une situation - formant une *totalité* - en une concaténation de *facteurs* et de *relations* (qu'elles soient causales, de covariance ou autre) et que ne peut être retrouvé par la suite au moment du ré-assemblage des facteurs introduits par le chercheur ; il conviendra donc de rester attentif, au cours de la recherche, à ce qui constitue peut-être des totalités [147] et requiert de notre part une prise en compte précautionneuse de son ensemble.

La recherche portant sur les *sujets psychologiques* - plutôt que le *sujet épistémique* [148] abstrait de Piaget - sont conduits dans l'équipe par Inhleder, qui a non seulement produit de nombreux résultats

144. Prioritairement utilisé pour parler des schèmes, Piaget et les travaux néo-piagétiens (voir p.ex. : Vergnaud, 1990) font aussi référence à ces processus pour l'élaboration des concepts, de telle sorte que ces processus paraissent très généraux.

145. Par exemple, la célèbre épreuve des trois montagnes reprise par Piaget et Inhelder (1948) de Meyer (1935), qui permet de montrer la difficulté de la décentration pour les enfants ; celle-ci reste d'ailleurs un défi à l'âge adulte, et la recherche a encore beaucoup à faire pour mieux comprendre ce défi posé à la cognition humaine (cité par Mounoud, 2000).

146. La distinction entre *sujet* et *objet*, telle que Piaget l'utilise, échappe à mon avis à la critique du dualisme philosophique (contrairement à des critiques que lui font des auteurs l'ayant mal compris, comme p.ex. Burman, 2008), auquel il souhaitait lui aussi offrir une alternative. Le concept *objet* en épistémologie génétique ne fait aucune assomption ontologique sur un monde des "objets" qui serait séparé du monde des "sujets" : est *objet* ce qui est *objet d'attention*, *objet d'étude*, ce qui constitue un *objet de connaissance*. Évidemment, l'anglais ne traduit guère ce sens-là du terme et lire Piaget en anglais est source de malentendu sur ce point.

147. Selon la définition de la Gestalt Theorie, nous sommes confrontés à une totalité chaque fois que le tout est plus que la somme de ses parties - c'est évidemment le cas pour les phénomènes sociaux de groupe, p.ex., et concerne d'emblée une recherche qui s'intéresse au fonctionnement d'une classe en milieu scolaire.

148. Pour en savoir plus sur cette distinction, voir p.ex. Atkinson (1983, 2006).

permettant de mieux comprendre la pensée des enfants (voir p.ex. : Inhelder, 1973 ; Inhelder & Piaget, 1955), mais qui a aussi permis de développer une démarche scientifique étudiant la pensée singulière, en situation (Inhelder, 1962 ; Inhelder & de Caprona, 1992 ; Inhelder et al., 1974). Parmi les nombreux apports de ces travaux, la conceptualisation par les auteurs des moments de passation des tests lors des recherche en tant que *situation d'apprentissage* (Inhelder et al., 1974) est tout à fait remarquable, et constitue également l'un des fondements de cette recherche, qui m'est parvenu à travers la psychologie socio-génétique (voir section 3.2.5, p. 130 et suivantes). La sensibilité de ces travaux à la singularité et à la complexité des situations dans lesquelles les personnes réfléchissent pour résoudre un problème, p.ex., rend possible une description et une explication de leur cheminement de pensée, documenté par des traces de leurs essais, tâtonnement, et de l'histoire que ces personnes construisent dans l'interaction avec le matériel, les autres personnes présentes etc, bref avec le *milieu* dans toute sa complexité. Cette approche clinique de la méthode micro-génétique constitue également l'un des fondements de cette recherche.

3.2.2 Une approche clinique de l'activité située

La perspective construite pour cette recherche emprunte également à la clinique de l'activité, terme général que j'utilise pour regrouper une famille de travaux centrés sur la construction d'une approche de l'activité située des personnes impliquées dans un apprentissage. Il y a évidemment des courants différents au sein de cette orientation générale, notamment une approche de la clinique des interactions sociales et des apprentissages (Canelas-Trevisi et al., 2009 ; Denis-Prinzhorn & Grize, 1966 ; Gilly et al., 1999 ; Grossen, 1988 ; Grossen & Salazar Orvig, 2006 ; Leutenegger, 2009 ; Schubauer-Leoni et al., 1992), les travaux d'analyses micro-génétiques (Tartas, 2012 ; Tartas et al., 2016 ; Wertsch, 2008), et des recherches faisant usage de cette orientation dans le champ de la psychologie du travail (voir p.ex. : Brassac & Grégori, 2003 ; Jobert, 2014 ; Kloetzer, 2013), qui s'est constitué comme un cadre théorique spécifiquement dénommé *clinique de l'activité* (voir p.ex. : Béguin & Clot, 2004 ; Clot, 2001, 2004 ; Clot & Faïta, 2000 ; Clot, Faïta, Fernandez, & Scheller, 2000), en reprenant également des éléments des théories de l'activité russes (voir p.ex. : Leontiev, 1975/1984, 2009) et de Vygotski (voir p.ex. : Clot, 1999), s'inscrivant ainsi dans le cadre théorique marxiste (Wozniak, 1975). Enfin, il n'est pas inintéressant de signaler, vu la place importante qu'a pris son œuvre dans la présente recherche, que Jean-Blaise Grize a lui aussi participé à cet intérêt pour une méthode clinique (Denis-Prinzhorn & Grize, 1966 ; Grize, Pauli, & Morf, 1970-1972).

Je reviendrai sur ce que je dois à ces recherches pour construire ma perspective, au moment de présenter la démarche méthodologique utilisée pour la recherche à la section 5.1.2 (p. 348 et suivantes).

Les recherches mettant en évidence le caractère situé de l'apprentissage sont encore plus diverses (pour un aperçu de cette diversité, voir p.ex. : Salembier, Theureau, & Relieu, 2004), et je me limite ici à signaler ma dette envers ces travaux, pour avoir choisi de considérer le phénomène des malentendus à l'échelon d'une situation, c'est-à-dire pour avoir introduit le concept de *situation de malentendu* et prévenir ainsi

qu'il ne soit repris ultérieurement en ignorant l'indispensable *situation* qui constitue, pour un ensemble de personnes et à un moment donné, une *situation de malentendu*[149].

Tous ces travaux soulèvent le problème du rapport entre l'individu et la société dans l'apprentissage (pour une discussion de cette question, voir : Carugati, 1999). Tournons-nous à présent vers la psychologie sociale, qui travaille à ce rapport entre individu et société depuis longtemps.

3.2.3 Une approche psychosociale de la construction des représentations

Le *regard psychosocial* construit en psychologie sociale apporte un nouveau souffle à la question de l'apprentissage, à condition de prendre distance avec la pratique expérimentale reposant exclusivement sur des modèles statistiques[150] et de renouer avec les travaux plus anciens permettant justement d'aborder des questions difficiles comme l'analyse de *situations sociales* comme des *totalités signifiantes*, à la fois du point de vue des acteurs et du point de vue des chercheurs.

Parmi ces travaux, la recherche de Mugny et Carugati (1985) sur les représentations de l'intelligence des enseignants met en évidence le lien entre ces représentations et la difficulté de faire reconnaître l'importance des processus de communication en milieu scolaire : la représentation majoritaire, particulièrement présente chez les enseignants qui sont également parents, est une représentation fixe et innée de l'intelligence qui minimise l'importance de la qualité de la communication en milieu scolaire sur les performances des élèves.

> *L'importance de la communication a d'ailleurs amené plusieurs chercheurs à en explorer les paramètres, notamment dans les échanges communicatifs entre pairs (cf. Beaudichon, 1982), autant qu'à approfondir une micro-analyse des interactions sociales entre enfants, notamment à propos d'épreuves piagétiennes (cf. Vandenplas-Holper, 1979). Le rôle de la communication se révèle d'ailleurs de première importance jusque dans le développement de connaissances mathématiques, du langage symbolique et de la preuve dans l'enseignement mathématique (Balacheff et Laborde, 1985 ; Schubauer-Leoni et Perret-Clermont, 1985).*
>
> *(...)*
>
> *Corollairement à cette (certes relative !) déresponsabilisation de l'enseignant apparaît avec systématicité une naturalisation de l'intelligence, sous forme à la fois de psychologie du don, de vision immobiliste et attentiste, et d'appel au maturationnisme biologique. Dans ce cadre on peut considérer qu'ici ces représentations jouent aussi un rôle de préservation de l'identité sociale, vraisemblablement mise en cause par la question lancinante de l'échec scolaire.*

149. La tendance à la réification est si forte (voir p.ex. : Kohler, 2017), que je ne doute pas que le terme *malentendu* utilisé seul ne soit rapidement considéré comme "une chose", un "événement", voire "un fait" alors qu'il ne s'agit, tout au plus, d'un système de relations entre des interlocuteurs (leurs points de vue) à un moment donné, dans un contexte particulier et relativement à des finalités personnelles, institutionnelles, etc.

150. L'usage sans réflexion des modèles statistiques procédant au découpage des phénomènes étudiés en facteurs et en variables, impossible ensuite à assembler en une théorie intelligible aux praticiens et utile dans les pratiques d'enseignement, aurait été inspiré délibérément par les États-Unis d'Amérique en période de guère froide (Moscovici & Marková, 2006), justement pour éviter la propagation d'une logique dialectique issue du matérialisme dialectique, historiquement associé au mouvement politique du communisme (alors que l'une ne conduit pas forcément au second). D'une grande efficacité, cette propagande politique serait à l'origine d'une réorientation de la psychologie sociale vers des pratiques techniciennes peu à même de procéder à une critique des sociétés contemporaines, et de fournir une théorie du social. Ces contingences historiques expliquent pourquoi je fais surtout usage de travaux anciens dans ce domaine.

(Mugny & Carugati, 1985, p. 32 & pp. 159-160)

J'aimerais citer une autre recherche, dont la posture de chercheur m'a particulièrement inspiré : la recherche de Jodelet (1989), qui s'intéresse aux représentations que construisent les habitants d'un village accueillant des patients d'un réseau de soin en santé psychique placés hors des murs d'une institution classique. Son étude de cas se donne pour tâche de justement rendre compte d'une *totalité* - un essai assez unique en son genre - pour mettre en lumière son fonctionnement social et cognitif. Les patients sont-ils considérés par les habitants comme "des fous", sont-ils l'objet de préjugés, voire de discrimination ? Cette recherche, particulièrement difficile par son objet d'étude, conduit l'auteure à préciser sa posture et sa démarche avec beaucoup de rigueur. Jodelet explique sa manière d'aborder la construction sociale de représentations - les représentations sociales - dans sa recherche :

> *Les processus constitutifs, l'objectivation et l'ancrage, ont trait à la formation et au fonctionnement de la représentation sociale dont ils rendent compte à partir de ses conditions d'émergence et de circulation, à savoir les interactions et les communications sociales. Voulant surtout insister sur le fait qu'ils donnent le moyen de penser l'intervention du social dans l'élaboration cognitive, nous n'en mentionnerons que les moments qui sont exposés en détail dans les présentations précédemment citées. L'objectivation rend compte de la représentation comme* construction sélective, schématisation structurante, naturalisation*, c'est-à-dire comme ensemble cognitif retenant, parmi les informations du monde extérieur, un nombre limité d'éléments liés par des relations qui en font une structure organisant le champ de représentation et recevant un statut de réalité objective. L'ancrage, comme* enracinement dans le système de pensée, assignation de sens, instrumentalisation du savoir*, rend compte de la façon dont des informations nouvelles sont intégrées et transformées dans l'ensemble des connaissances socialement établies et dans le réseau de significations socialement disponibles pour interpréter le réel, puis y sont ensuite réincorporées en qualité de catégories servant de guide de compréhension et d'action.*
>
> *(Jodelet, 1989, pp. 46-47)*

Elle vise à étudier "la genèse des représentations" (*idem,* p. 48), ce qui explique l'importance qu'elle donne dans ses analyses à la contextualisation, ce qui lui permet d'aborder la situation de ce village comme une totalité, et explique sa focalisation sur les processus. Sa démarche se construit également à partir d'une critique méthodologique des recherches sur les conceptions :

> *Dépasser certaines insuffisances généralement constatées dans les études de terrain sur les représentations sociales et qui affectent la fiabilité du matériel recueilli et servant de base aux inférences. Rappelons quelques critiques formulées à propos, notamment, de l'enquête par questionnaire ou entretien : imposition à la population interrogée de la problématique, des préconceptions et des catégories du chercheur ; hypothèse de la transparence des discours ; clôture du discours coupé de son contexte de production et sans rapport avec les pratiques ; réponse de complaisance ou de désirabilité sociale ou encore rationalisations par rapport à des positions effectivement adoptées ; caractère intuitionniste des interprétations ; lecture du sens de type herméneutique sans maîtrise des mécanismes d'émergence des significations, etc. Pour éviter ces écueils, il est nécessaire de replacer les représentations, dans leur contexte d'émergence et de fonctionnement.*

(Jodelet, 1989, p. 52)

L'auteure partage également ses réflexions critiques sur la psychologie en introduction, dont je ne peux résister au plaisir de citer un passage pour en montrer les liens profonds qu'il entretient avec le problème que j'ai choisi d'étudier :

> *Si la psychologie cognitive a mis en évidence les propriétés structurales de la représentation, la dominance des modèles basés sur le traitement de l'information et l'étude computationnelle de l'intelligence artificielle y a produit ou renforcé une conception du processus mental, coupé d'avec le lien social, et sa base psychique et corporelle. S'appuyant sur la représentation du savoir dans un ordinateur, on conçoit la connaissance comme modélisation de certains aspects, traits, relations du monde représenté. Ce savoir est analysé en tant que* structure *- en distinguant ses contenus et ses formes (le savoir déclaratif) et ses opérations (le savoir procédural) - dont le stockage met en relief l'importance de la* mémoire*. Pour important qu'elle soit, cette formalisation, subordonnant l'analyse psychologique aux contraintes de l'informatique, est amenée à négliger plusieurs aspects de la représentation.*
>
> *L'aspect symbolique, d'accord. On étudie la connaissance sans préjuger de sa correspondance avec une quelconque réalité (Mandler, 1983) et sans tirer les implications du fait que la représentation "tient lieu de" et signifie un aspect du monde, à soi-même ou aux autres. Négligeant les fonctions référentielle et communicative de la représentation, on aboutit à une formalisation hypothétique où l'intra-mental est fermé sur lui-même. Or, comme il ressort de l'examen des formulations les plus connues de cette perspective (par exemple, Minski, 1977; Schank et Abelson, 1977), faute d'avoir intégré la propriété symbolique dans le modèle théorique, on doit la réintroduire pour rendre compte du fonctionnement cognitif en situation réelle. Les structures postulées (*frames, scripts*, etc.) ne peuvent être appliquées qu'en s'aidant du langage, de l'expérience et des savoirs partagés dans une même culture. Ce que confirment d'autres auteurs traitant du savoir sur le monde et des conceptualisations portées par le langage (par exemple, Johnson-Laird et Wason, 1977; Miller, 1978). Cela suffit à souligner la nécessité d'inclure la dimension sociale et la communication dans tout modèle de la connaissance.*
>
> *(Jodelet, 1989, p. 43)*

Jodelet soulève aussi des pistes pour les futures recherches en psychologie cognitive, qui permettraient de soutenir le travail sur les représentations sociales, en particulier la spécification de ce que sont les "connaissances" :

> *... leur statut en tant que "formes cognitives" n'est pas élucidé. Ces connaissances sont vues comme des contenus dont l'opérativité est rapportée à des processus qui leur sont extérieurs : logique discursive assurant leur mise en "acceptabilité" dans l'échange social (Faye), "idéo-logique" définissant simultanément l'ordre intellectuel et l'ordre social (Augé), "magie performative" des énoncés que légitiment la cohésion et la dynamique des groupes (Bourdieu), etc. On ne s'interroge pas sur les propriétés cognitives de ces contenus qui, socialement générées, favorisent leur adoption dans une collectivité et leur intervention dans la totalité sociale.*
>
> *(Jodelet, 1989, p. 45)*

Pour préciser ce point, intéressons-nous à l'approche cognitive.

3.2.4 Une approche cognitive des processus et des connaissances

Concernant les processus d'apprentissage, je retiens des travaux classiques (pour une synthèse de la littérature, voir : Weil-Barais, 1993) notamment les concepts suivants :

— l'*empreinte*, peu important dans cette recherche ;

— l'*habituation*, qui joue un rôle dans la constitution des routines scolaires, des normes sociales et des attentes institutionnelles, etc. ;

— l'*imitation* (avec ses diverses variantes, voir p.ex. : Winnykamen 1990) par laquelle l'enseignant - ou parfois les pairs - jouent par moment le rôle de modèle pour les élèves ;

— l'*apprentissage associatif*, quoique je le considère limité aux situations où l'apprenant n'a pas la possibilité d'agir et d'apprendre par son action propre, suivant en cela la critique que fait Piaget (1972a) [151] des usages qu'il considère abusifs de ce concept ;

— le *conditionnement* (avec ses diverses variantes), également impliqué dans la construction sociale des routines, des diverses normes et des attentes ;

— l'*apprentissage par l'action* décrit notamment dans les travaux piagétiens, et reposant sur les concepts

  — de *boucle rétro-active* permettant la répétition du même avec des variations, présent également chez Baldwin (1895), et qui conduit à une théorisation de l'apprentissage comme un processus créatif et organique plutôt que mécanique ;

  — d'*adaptation*, dans un double mouvement comprenant l'*assimilation* du nouveau aux connaissances du sujet, et l'*accommodation* de ses connaissances à la nouveauté [152] ;

— l'*apprentissage co-actif*, ou *apprentissage coopératif* [153], concept plutôt vague (pour une synthèse en français, voir : Rouiller & Lehraus, 2008), notamment à l'occasion de pratique de tutorat

151. La critique de Piaget se focalise notamment sur l'expérience de Michotte, qui permet de bien mettre en évidence les explications alternatives que produisent la théorie de l'apprentissage associatif et l'épistémologie génétique quant aux mêmes observations des conduites des participants à l'expérience. Si le débat sur la précocité des acquisitions conceptuelles, notamment de la causalité, est repris aujourd'hui par les opposants à Piaget (voir p.ex. : Baillargeon, 2008 ; Saxe & Carey, 2006), je ne peux m'empêcher de trouver les arguments de Piaget plus convaincants, aujourd'hui encore, sur le plan théorique : l'*apprentissage par l'action* permet en effet de rendre compte des projections de la causalité par les sujets sur des stimuli visuels où cette causalité n'est pas pertinente, alors que la théorie de l'*apprentissage associatif* manque d'expliquer le problème de la pertinence des associations qu'effectuent les sujets (pour une démonstration de l'importance de cette pertinence dans les associations effectuées par des êtres humains dans une recherche adoptant pourtant le cadre théorique du traitement de l'information, voir p.ex. : George, 1980) lors de leurs apprentissages (voir aussi à ce sujet : Sperber, Premack, & James Premack, 1995).

152. Dans cette recherche, j'étendrai l'usage de ce double processus importé par Baldwin et Piaget de la biologie aux discours, élargissant l'apport de nouveauté du milieu souvent abordé en psychologie comme des stimuli perceptifs ou, pour Piaget, comme l'action propre du sujet, aux discours eux-mêmes en tant qu'éléments pertinents d'un milieu auquel l'élève est invité à s'adapter.

153. Ce terme a malheureusement pris la place d'une forme d'organisation de l'*enseignement* (voir p.ex. : Abrami et al., 1996), qui rend désormais ambigu son usage pour désigner un processus d'apprentissage, d'où la proposition de Weil-Barais (1993) de le désigner par *apprentissage co-actif*.

— l'apprentissage par instruction, qui comprend notamment l'écoute (active) d'un discours par les élèves, mais aussi l'appropriation de consignes et de tâches conçues pour facilier les apprentissages des élèves ;

— la *prise de conscience*, au sens de Piaget (1974b, 1974c), qui appartient à ce qui est désormais identifié comme la métacognition (pour une brève synthèse en français, voir : Bell, 1991), et constitue une étape subséquente à une première acquisition, permettant une plus grande maîtrise ou expertise.

Il ne suffit évidemment pas de faire une liste des processus d'apprentissage connus pour fournir une définition de l'apprentissage. Cette approche conceptuelle permet de se faire une image synthétique de la complexité de l'apprentissage humain ; mais elle soulève notamment deux questions particulièrement difficiles :

1. Comment ces divers processus s'articulent-ils entre eux pour des élèves, dans une situation ordinaire en milieu scolaire ?

2. Comment ces processus s'articulent-ils aux connaissances élaborées par les élèves au cours de leurs apprentissages ?

La première question invite à sortir la recherche du laboratoire, tout en reprenant l'outillage théorique que la psychologie a pu y développer, pour aborder la question des processus d'apprentissage en situation, pour des élèves particuliers inscrits dans leurs histoires singulières. En abordant l'apprentissage de la physique à travers des situations de malentendu, cette recherche propose une regard transversal à ces processus, permettant éventuellement de mieux comprendre comment ils s'articulent les uns aux autres dans une pratique en milieu scolaire. La focalisation sur le discours permet de centrer l'observation sur l'apprentissage par instruction, processus peu étudié malgré son usage dominant dans nos sociétés modernes, puisque l'idée même d'une institution scolaire dispensant des cours repose sur la priorité donnée à ce processus, par opposition par exemple à la formation en entreprise qui repose davantage sur les processus d'imitation et d'adaptation à un milieu. Par ailleurs, la séquence d'enseignement étudiée faisant usage d'une organisation de l'enseignement de type "apprentissage coopératif", le processus d'*apprentissage co-actif* cité ci-dessous sera également au centre des observations.

La seconde question nécessite une typologie des connaissances, aussi imparfaite soit-elle, qui puisse au moins rendre possible l'observation de ce que ces processus d'apprentissage permettent effectivement aux élèves d'acquérir. Sans fournir au moins *un essai* de théorisation, les connaissances construites en milieu scolaire par les élèves ne sont pas observables. Dans ce cas, les processus d'apprentissage ne peuvent pas non plus, par conséquent, faire l'objet d'une investigation en milieu naturel. Comment pourrais-je prétendre étudier un processus d'apprentissage si je ne peux montrer que le processus en question a effectivement permis d'apprendre *quelque chose* ?

Voici mon essai de typologie des connaissances, qui reprend le modèle néo-piagétien présenté par Weil-Barais (1993) en y intégrant les apports récents de Vergnaud (1994a, 1994b, 1994c, 1994d, 1996, 2009a,

2009b) et Pastré (2007) ; Pastré, Mayen, et Vergnaud (2006) ; Rabardel (1995) ; Samurçay et Pastré (2004) [154] :

- dans un premier groupe se distinguent trois types de *conduites* ;
  - aux *habitudes* [155] correspondent les conduites automatisées, libérant l'attention pour d'autres processus, qu'elles soient des habitudes cognitives, sociales ou autres ;
  - aux *schèmes* (sensori-moteurs, perceptifs, affectifs, etc.) correspondent les conduites spécialisées qu'une personne s'est appropriée en fonction des situations où elles sont utilisées et jugées pertinentes ;
  - aux *gestes professionnels* [156] correspondent des ensembles cohérents de schèmes liés à une pratique professionnelle, par exemple les schèmes que mobilise un serveur lorsqu'il agit en tant que professionnel dans un restaurant et qu'ils n'utiliserai pas s'il s'y rendait en tant que client ;
- et dans un second groupe se distinguent divers types de connaissance faisant usage de la fonction sémiotique ;
  - aux *connaissances prédicatives* correspondent les usages d'un langage permettant de "dire que" (Weil-Barais, 1993, p. 450), parmi lesquelles les expressions par le discours de représentations mentales, d'éléments de mémoire épisodique, d'associations ou relations (très fréquentes en milieu scolaire, où l'on apprend que *deux plus deux font quatre*, par exemple, sans avoir justement effectué la moindre *opération* d'*addition*) ou encore l'expression de catégories [157] ou de définitions ("les insectes sont les êtres vivants ayant six pattes") ;
  - aux *connaissances opératoires* correspondent les transformations que la personne s'est appropriée, qu'elles consistent en *opérations concrètes* ou *formelles*, et qu'elles transforment des objets concrets - comme la pâte à modeler - ou des objets symboliques - comme une expression mathématiques rédigée sur une feuille, ou un verbe pour le conjuguer selon une règle morphologique ;
  - aux *concepts* correspond un triptyque constitué de situation(s) [158], invariant(s) et symbolisation(s), précisément décrit par Vergnaud (1985), qui a la particularité de relier les autres types de connaissances entre elles [159] pour un *champ conceptuel* dans lequel le *concept* est utile et

154. Même si ces auteurs se revendiquent d'une didactique professionnelle, leur théorisation s'intègre parfaitement bien dans le modèle néo-piagétien et le complète sur des dimensions laissées dans l'ombre jusque là dans ce modèle, comme l'usage des outils et des instruments (voir par exemple la notion d'*artefacts* telle qu'elle est utilisée par Rabardel, 1995).

155. Une distinction explicite entre *habitudes* et *schèmes* se trouve par exemple chez Pastré et al., 2006, p. 12.

156. La spécificité des *gestes professionnels* par rapport aux *schèmes* pourrait faire l'objet d'un débat : introduire ce type de connaissance permet surtout de reconnaître une nouvelle *totalité organisée* et *finalisée* par l'exercice de la profession, qui commence d'ailleurs à être étudiée pour la profession enseignante (voir p.ex. : Bucheton, Brunet, Dupuy, & Soulé, 2008 ; Bulf, 2016 ; Giglio, Boissonnade, & Kohler, 2017), mais demeure encore peu connue dans le détail.

157. Les *connaissances prédicatives* de relations et de catégories peuvent bien entendu également constituer l'expression de *concepts*, mais ce n'est pas forcément le cas : c'est justement sur ce point que le modèle néo-piagétien est particulièrement intéressant en ce qu'il permet de distinguer une forme discursive retenue par cœur - une connaissance prédicative - d'une connaissances conceptuelle qui ne se réduit pas à cette expression discursive en tant que telle.

158. Le terme "situation" est délibérément utilisé par l'auteur dans un sens restreint, qui se limite à la variation et à l'historicité (pour plus de détails, voir : Vergnaud, 1990), qui n'est pas tout à fait le même que celui que je développe dans cette recherche (voir le glossaire à l'annexe D, p. 795.

159. Les recherches - et notre expérience quotidienne - ont en effet souvent mis en évidence le manque de cohérence entre les connaissances prédicatives et les schèmes d'action pour un même individu, phénomène typique des tentatives infructueuses

pertinent, c'est-à-dire dans lequel il permet également la reconnaissance de *situations*, l'usage de *schèmes*, et la mise en oeuvre d'*opérations* ;

— dans un troisième groupe, "méta-" par rapport aux deux premiers, se distinguent des connaissances au sujet des connaissances des types mentionnés ci-dessus ;

  — aux *méta-connaissances*, connaissances au sujet des connaissances (par exemple connaître le degré de certitude d'une théorie - par ailleurs connue - ou connaître ses défenseurs et ses détracteurs), correspondent les stratégies (conscientes, intentionnelles et volontaires) et la régulation de son activité d'apprentissage (souvent inconsciente, p.ex. contrôler son activité, mais pas toujours, p.ex. procéder à une auto-évaluation), et d'autres connaissances permettant l'optimisation de l'activité cognitive ;

  — à la *conscience*[160] correspond la connaissance de ses propres connaissances et de leurs limites (relativement à un sujet particulier), mais aussi la *réflexivité* qui permet de rendre compte des choix effectués, de les argumenter et les justifier, par exemple ;

  — aux *connaissances instrumentales*, correspondent l'appropriation par la personne d'*artefacts* ou d'autres connaissances de manière à en faire un usage personnel pour ses propres motifs, par exemple utiliser un mot pour communiquer autre chose que sa signification lexicale - comme on le fait en poésie -, ou pour faire rire en pratiquant des jeux de mots, mais aussi utiliser un concept pour résoudre un problème ou une énigme, ou encore construire ses propres *instruments*, par exemple en inventant un nouveau système sémiotique[161] permettant de disposer d'un méta-langage. La *modélisation* permet de construire ou d'adapter de tels systèmes sémiotiques pour répondre à des questions ou problèmes spécifiques : utilisée dans ce sens, elle est aussi une *connaissance instrumentale*.

Je n'ai pas repris dans la typologie la distinction très fréquemment utilisée entre *connaissances/savoirs déclaratifs* ("declarative knowledge") et *connaissances/savoirs procéduraux* ("procedural knowledge"), appartenant aux sciences cognitives de la théorie du *traitement de l'information* et étant en compétition, au niveau théorique, avec la distinction piagétienne - que reprend Vergnaud dans sa *théorie des champs conceptuels* - entre *schèmes*[162], *connaissances prédicatives* et *connaissances opératoires*.

visant à diminuer la consommation de tabac par l'exposition à des messages verbaux (Falomir, 2004), par exemple, ou que la théorie de la dissonance aborde en proposant un modèle du processus en cause (voir p.ex. : Clémence, 1991 ; Festinger, 1957).

160. Placer la conscience comme un type de connaissances dans une typologie a pour corollaire de considérer qu'il est possible, au moins partiellement, d'augmenter la part du conscient relativement à son propre fonctionnement cognitif, une hypothèse à laquelle je souscris volontiers personnellement mais nécessite certainement encore des recherches empiriques pour pouvoir être établie, nuancée ou réfutée. Elle fait néanmoins déjà l'objet de mise en évidence expérimentale dans le domaine de l'apprentissage des langues, où par exemple la *conscience morphologique* (voir p.ex. : Chapleau, Saidane, & Fejzo, 2016) joue un rôle important dans l'acquisition d'une langue : le fait d'être conscient de la morphologie permet en effet de meilleurs apprentissages et usages de la langue.

161. De telles pratiques sont désormais fréquentes dans de nombreux domaines spécialisés, et il suffit par exemple de penser à toutes les icônes rencontrées sur nos appareils numériques, construits comme une langage de navigation et un interface de commande de la machine, pour se rendre compte de l'omniprésence de l'exigence de *connaissances instrumentales* dans nos sociétés actuelles.

162. Dans bien des cas, ce que les uns considéreraient des *connaissances/savoirs procéduraux* correspondent à des *habitudes*, à des *conduites* que la théorie piagétienne ramène à des *schèmes* pour distinguer la *conduite* elle-même des connaissances du sujet qui l'effectue, alors que dans d'autres cas il s'agirait de *connaissances opératoires*.

Cet essai de typologie, même si elle vise à reprendre dans un rapide panorama l'ensemble le plus complet possible de connaissances humaines, ne fournit évidemment qu'un rapide aperçu de la complexité de l'articulation entre les *processus d'apprentissage* effectués par les élèves et les *connaissances* que ces processus leur permettent de construire. D'une part, ce panorama demeure incomplet sans une discussion de la spécificité relative au domaine des savoirs enseignés, ce que je n'aborderai que pour la physique newtonienne, et seulement lors des analyses pour éviter une fastidieuse présentation préalable.

D'autre part, ce panorama ne suffit pas à rendre compte de la complexité du phénomène de l'apprentissage, sans y ajouter les apports des multiples approches présentées par ailleurs, qui permettent des éclairages différents sur l'apprentissage. Par contre, la liste des processus d'apprentissage inventoriée et l'essai de typologie des connaissances présenté ci-dessus permet peut-être de fournir un cadre de référence pour articuler la diversité des approches sur notre objet d'étude : l'ensemble des concepts introduits fournit le vocabulaire indispensable à l'élaboration d'une théorie. Autrement dit, si j'osais une métaphore, la psychologie cognitive apporte des matériaux avec lesquels construire un édifice théorique ; mais la *juxtaposition* de ses nombreux résultats fait qu'il y manque une *organisation raisonnée* - une *logique* - pour constituer une théorie de l'apprentissage qui peut, à terme, expliquer des situations singulières et être utiles aux professionnels. À mon avis, ce sont plutôt les approches centrées sur les processus qui sont à même de fournir une telle organisation, à commencer par l'approche socio-cognitive qui établit le lien entre l'épistémologie génétique - son *constructivisme* et son *interactionnisme* - et les processus d'apprentissage de personnes singulières, en situation.

Weil-Barais souligne d'ailleurs à ce propos en 1993 déjà, l'émergence d'une nouvelle hypothèse concernant les processus d'apprentissage qui permettraient de rendre compte de la supériorité de l'apprentissage coactif sur l'apprentissage individuel : "une autre piste interprétative explorée actuellement est issue de la considération selon laquelle l'accès aux connaissances relève d'un processus communicationnel" (Weil-Barais, 1993, p. 490). Ce "processus communicationnel" reste néanmoins à préciser, à cette étape de la discussion.

3.2.5 Une approche socio-génétique et socio-cognitive

À partir des premiers travaux sur le conflit socio-cognitif (pour une brève histoire du concept, voir : Zittoun, Perret-Clermont, & Carugati, 1997), qui ont mis en évidence l'importance *du social* dans l'acquisition d'une étape vers la *conservation* qu'étudiait l'équipe de recherche en épistémologie génétique, l'approche socio-cognitive s'est orientée ensuite (pour une synthèse, voir : Carugati & Perret-Clermont, 2015 ; Perret-Clermont & Carugati, 2001) à la fois vers une psychologie du développement de l'enfant (voir p.ex. : Psaltis, Duveen, & Perret-Clermont, 2009), et vers des recherches centrées sur les *situations d'apprentissage* (Breux & Perret-Clermont, 2014 ; Muller Mirza & Perret-Clermont, 2008 ; Perret-Clermont, 1992 ; Perret-Clermont & Carugati, 2004 ; Perret-Clermont, Perret, & Bell, 1991 ; Psaltis & Zapiti, 2014 ; Schwarz, Perret-Clermont, Trognon, & Marro, 2008 ; Tartas & Perret-Clermont, 2008). Les rapports complexes entre *développement cognitif* et *apprentissage en situation*, a d'ailleurs conduit Iannaccone et Perret-Clermont

(1993) à publier une clarification sur la ligne de démarcation entre ces deux champs de recherche, proches l'un de l'autre et néanmoins distincts à certains égards.

Tous ces travaux contribuent à souligner l'importance d'une recherche sur l'apprentissage qui considère le processus d'acquisition des connaissances non pas abstraitement, mais pour des personnes singulières, inscrites dans une histoire, une situation et un contexte social, institutionnel et culturel particulier. Les travaux se sont alors orientés vers l'étude des conditions concrètes de l'émergence d'un *espace de pensée* (Perret-Clermont, 1991, 2001, 2011, 2015 ; Zittoun & Iannaccone, 2014), notamment à partir d'une recherche sur l'*espace thérapeutique* (Grossen & Perret-Clermont, 1992), puis vers des recherches explorant les pratiques argumentatives et leur potentiel pour l'apprentissage (Mehmeti & Perret-Clermont, 2016 ; Perret-Clermont, 2000 ; Perret-Clermont & Muller Mirza, 2009) et dans le développement de l'enfant (Greco Morasso et al., 2015 ; Perret-Clermont et al., 2015 ; Sinclaire-Harding et al., 2013) [163].

Parmi toutes ces recherches, dont je ne saurais surestimer l'importance pour la présente étude, l'une d'entre elles soulève la question que j'ai reprise - d'abord sans m'en apercevoir - pour questionner la méthodologie des travaux sur les conceptions des élèves dans l'apprentissage des sciences : Nicolet et al. (1988) interpellent les travaux de recherche interrogeant les enfants en situation de test, auxquels elles participent, avec cette question "Testons-nous des compétences cognitives ?". Les auteurs interpellent l'attribution faite à partir des conduites des enfants participant à des épreuves piagétiennes à la *cognition* de l'enfant, en fournissant des arguments en faveur d'une prise en compte de la situation toute entière dans l'interprétation des conduites des enfants. Elles remettent en question la capacité de telles recherches à atteindre des "mécanismes fondamentaux et universaux de la pensée" (*idem,* p. 3), en mettant en évidence une corrélation entre les origines sociales des enfants et leur performance aux tests. Mais c'est surtout la recherche des "éléments médiateurs" de cette corrélation, que les auteurs recherchent en faisant l'hypothèse qu'ils "sont déjà discernables hic et nunc au sein même de la situation de test" (*idem,* p. 4) qui est particulièrement intéressante. Les auteurs pointent justement "le rôle spécifique des modalités d'interrogation" (*idem,* p. 5) comme médiateur de ces différences de performance aux épreuves piagétiennes liées aux origines sociales des enfants, de manière tout à fait analogue à l'hypothèse des sociologues d'un *malentendu* dans l'interaction entre enseignants et élèves à l'origine de la reproduction des inégalités sociales (voir section 3.1.1, p. 99 et suivantes). Ces observations conduisent les auteurs à reconceptualiser les situations de test comme des "situations de rencontre", ce que je reprends ici pour aborder la situation d'apprentissage en milieu scolaire à travers d'éventuelles *situations de malentendu*, le phénomène de *malentendu* apparaissant comme l'incident critique de cette "rencontre", qui peut expliquer les différences de performances selon les origines sociales.

Ces résultats sont repris par la suite pour discuter des situations où les enfants sont amenés à apprendre des contenus plus culturellement marqués que ceux auxquels les exposaient les épreuves piagétiennes, comme les savoirs enseignés à l'école :

163. Voir également l'approche "argumentation pour apprendre" à la section 3.2.12, p. 155 et suivantes.

> *Il apparaît en effet que leurs formulations (celles des enfants, nda) sont d'autant plus explicites qu'ils ont dû les produire en interagissant avec une autre personne et en fonction de la nécessité d'une communication à un tiers. (...)*
>
> *Nos recherches précédentes avaient mis en évidence le rôle des interactions sociales pour l'acquisition de structures opératoires. La prise en considération d'objets d'apprentissage plus culturels (représentations dans le dessin, formulations d'opérations mathématiques) attire l'attention du chercheur sur le rôle des processus de communication dans le développement de ces conduites cognitives. Ni la représentation graphique, ni l'activité mathématique* ne peuvent être expliquées uniquement par *le développement des possibilités opératoires des sujets.*
>
> *(Perret-Clermont, 1980, p. 7)*

Perret-Clermont s'est également intéressée à la pédagogie interculturelle (Dinello & Perret-Clermont, 1987), où la communication est examinée en relation au cadre culturel plus général. L'interculturalité actuelle dans les milieux scolaires renforce sans doute l'intérêt des approches s'intéressant à la communication. Que ce soit dans les travaux d'épistémologie génétique, ceux de psychologie cognitive ou dans l'approche socio-cognitive, la communication semble constituer la pierre de touche des difficultés de théorisation des processus d'apprentissage, et la tâche aveugle des approches majoritaires en psychologie [164], dont les travaux sélectionnés pour ma présente discussion font une critique pointue et technique.

Cet état de la recherche s'explique peut-être en partie par la difficulté d'une construction théorique permettant à la fois d'aborder les processus communicatifs et cognitifs à partir de traces empiriques. Mercer (2008a) souligne dans son commentaire de Treagust et Duit (2008) le besoin d'un cadre théorique permettant d'articuler les dimensions sociale, en particulier la communication, et cognitive dans l'étude du changement conceptuel :

> *My conclusion is that while more empirical research is needed to understand how dialogue is involved in conceptual change, available evidence shows very clearly that the role of talk and social interaction is so significant that it cannot be ignored. It is therefore necessary for theoretical accounts to deal with both social (i.e. communicative) and cognitive aspects of conceptual change.*
>
> *(Mercer, 2008a, p. 351)*

Si les chercheurs reconnaissent bien que les conceptions puissent s'exprimer par la conversation, Mercer (2008a) souligne néanmoins qu'ils ne considèrent pas l'activité de conversation elle-même comme affectant ces conceptions dans les méthodes d'analyse du discours utilisées. Il me semble aussi que c'est là le problème principal de la littérature portant sur le *changement conceptuel* : elle considère les conceptions comme individuelles *par définition*, et même si le caractère dynamique et situé de ces conceptions individuelles est accepté dans le discours théorique (voir p.ex. : Vosniadou, 2008), les chercheurs continuent de

164. En psychologie cognitive, cette découverte de la centralité du langage est connue sous le terme de "deuxième révolution cognitive" (Harré & Gillett, 1994), mais les approches issues de ce cadre théorique qui s'intéressent à l'apprentissage des sciences ont plutôt *remplacé* les connaissances - au sens de ma typologie ci-dessus - par l'analyse du langage ou des interactions sociales, au lieu d'en proposer une articulation permettant de discuter le passage d'un échelon à l'autre dans une perspective prenant en compte la complexité des rapports entre langage et pensée, comme nous souhaitons le faire pour étudier les *situations de malentendu*.

traiter les conceptions des apprenants et le *changement conceptuel* dans leurs analyses sans porter aucune attention à la manière dont le dispositif de recherche influencent les discours produits par les élèves ou, plus généralement, leur manière de répondre aux attentes institutionnelles de l'école.

Par exemple, les questions posées par les chercheurs aux participants ne sont pas incluses dans une analyse communicationnelle, au moment d'interpréter les réponses des élèves. Par conséquent, le dispositif de recherche et, en particulier, les questions adressées aux participants sont considérées *de facto* comme univoques. Or, les risques de malentendu dans de telles démarches de recherche sont importants, et conduisent d'ailleurs régulièrement les chercheurs à redoubler de vigilance quant à la présence de biais méthodologiques, voire à abandonner un ensemble des traces recueillies à défaut de pouvoir les ranger parmi les conduites prévues. L'explicitation des enjeux d'une échelle et du choix d'un ou plusieurs échelons (voir le chapitre 2), permet de montrer qu'il ne s'agit pas seulement d'une problème méthodologique [165] : cette recherche aborde le phénomène des malentendus justement parce que j'ai fait l'hypothèse que ce problème n'est pas seulement un problème méthodologique, mais qu'il joue un rôle essentiel dans les difficultés à rendre compte des processus d'apprentissage que rencontre la recherche, et tout particulièrement la recherche sur l'apprentissage conceptuel.

Plusieurs auteurs se sont pourtant attaqués à ce problème, avec des recherches visant à décrire les processus d'apprentissages effectués dans et par les interactions sociales à partir d'une perspective articulant sciences du langage et de la communication et psychologie (voir p.ex. : Gilly et al., 1999 ; Mercer, 1995). Avant de discuter ces recherches plus en détail, je souhaite encore souligner l'importance pour cette recherche de la cybernétique, et de la pragmatique, qui constituent également des fondements historiques aux analyses de la construction des connaissances dans et par le communication.

3.2.6 Une approche cybernétique et pragmatique de la communication

Le travail de Watzlawick et al. (1967/1972) sur la *logique de la communication* a permis de montrer le potentiel explicatif des études s'intéressant à la communication en décrivant la fabrication de certains troubles psychiques à partir de pratiques de la communication très spécifiques, notamment la *communication paradoxale*. En montrant la construction des relations et de la pensée individuelle dans et par la communication, cette approche fournit un argument empirique magistral à l'épistémologie constructiviste et interactionniste, par extension de la *construction* du psychisme au champ de la communication, lieu par excellence de l'*interaction* [166] d'un être humain avec son *milieu*. En outre, cette explication permet d'expliquer un phénomène - certains troubles psychiques ou certaines relations - par une activité humaine *à un autre échelon* : les formes ou structures des échanges verbaux finissent par constituer, à force de

165. Pour rappel, mon argumentaire vise à montrer que même la plus grande rigueur des chercheurs quant aux éventuels biais méthodologiques de leurs recherches ne garantit pas la pertinence de leur résultat, notamment parce que l'attention de la recherche ne s'est peut-être pas portée à l'échelon où le phénomène peut être décrit, ou parce que la recherche constitue un vaste malentendu quant à ce qui est effectivement *observé*. Il est dès lors indispensable de discuter ouvertement de la pertinence de la perspective choisie et construite pour une recherche spécifique, et de la soumettre aux règles d'une argumentation explicite puis au débat au sein de la communauté scientifique.

166. À condition, bien sûr, d'inclure les *interactions symboliques* dans les *interactions* au sens de Piaget, comme je l'ai argumenté plus haut.

répétition et à mesure qu'elles construisent un *milieu* (symbolique) pour la personne affectée, une relation voire un trouble psychique individuel [167].

Ces travaux sont très importants pour cette recherche, car l'étude des pratiques de la communication que je propose en me focalisant sur des *situations de malentendu* pourrait révéler le même genre de passage entre des échelons différents, si notre description de ces situations permettent de montrer comment l'apprentissage ou son absence sont fabriqués dans la communication entre élèves et enseignant.

En outre, cette approche fait le lien entre l'épistémologie génétique et l'analyse de la communication, en reprenant - *via* la la cybernétique (et en particulier Bateson, 1980) - l'usage des *boucles rétro-actives* et de la théorie des systèmes dynamiques : cette approche est de fait une extension du modèle néo-piagétien à l'analyse des effets de la communication.

Watzlawick et al. (1967/1972) utilise l'adjectif *pragmatique* pour spécifier la focalisation de leur approche sur les effets de la communication : ils peuvent ainsi mettre en évidence le rôle essentiel que joue les actes effectifs de communication dans la construction de relations interindividuelles, sur la qualité et la nature de ces relations, et lors d'une appropriation des schéma relationnels par un individu sur les effets de la communication sur la santé psychique.

La pragmatique met en évidence le fait que communiquer c'est agir, ce qui est essentiel à notre perspective visant à étudier les actions et les opérations des élèves sur les discours : il est essentiel dans ma démarche d'aborder le discours et la communication comme faisant référence au monde et à l'expérience des personnes, principe essentiel des origines de la pragmatique (Dewey, 1938/1993), et de prévenir toute tentation d'analyser le discours hors de son contexte et de son ancrage dans une situation vécue, qui a eu lieu.

La pragmatique s'intéresse à la communication et à l'usage de la langue non seulement en fonction des règles - règles linguistiques, règles de la conversation orale (voir p.ex. : Blanche-Benveniste, 1997) voire de la communication (voir p.ex. : Grice, 1979) - mais aussi en fonction de son *contexte*. Sperber et Wilson (1986) discutent plusieurs acceptions possible de ce qu'est ce *contexte* et mettent en garde contre une tendance a n'y voir que des implicitations voulues par les locuteurs : souvent, dans la conversation, nous ne chercherions qu'à être pertinent en tant que locuteur et sommes loin de maîtriser toutes les possibles implicitations de notre discours dont l'interlocuteur peut se saisir pour interpréter nos propos. En bref, il y a de l'accidentel et de l'imprévisible dans le processus d'interprétation, ou d'inférence du sens à partir de la langue utilisée par autrui. Cette réflexion est essentielle pour aborder des incidents critiques comme les situations de malentendu.

167. Au sens d'une *appropriation* individuelle, où la personne affectée va reproduire ces formes ou structures dans son rapport au monde des objets, et dans ses nouvelles relations, *prenant avec soi* ce qu'elle a d'abord acquis en relation et par la communication avec autrui.

Elle motive Ghiglione et Trognon (1993) à proposer une *pragmatique inférentielle ouverte*, permettant au chercheur de mener une enquête ouverte sur les multiples dimensions du contexte des discours analysés. Il se réflère à Jacques pour définir la dimension pragmatique de la communication :

> *Sont pragmatiques les traits qui donnent à un fragment linguistique une fonction dans un acte ou un jeu de communication.*
>
> *(Ghiglione & Trognon, 1993, p. 33).*

Cependant, il faut encore ajouter à cela un "enjeu commun, au moins en partie, (...) nécessaire à l'établissement d'une communication" (p. 104), de telle sorte que l'intention communicative "se fondant sur la production et l'interprétation d'indices, assez souvent linguistiques, qui constituent autant de traces des structures et opérations cognitives, mobilisées par le locuteur pour co-construire une intention communicative spécifique et utilisée par l'interlocuteur pour interpréter cette intention." (*idem,* p. 104). Dans le projet d'identifier des malentendus, je retiendrai ici que les indices, souvent linguistiques, utilisés dans l'interprétation sont considérées comme des "traces des structures et opérations cognitives" (*idem,* p. 104). À cela les auteurs ajoutent : "Toutefois on ne présuppose en aucune façon qu'il existe une adéquation nécessaire entre l'intention et l'interprétation." (*idem,* p. 104). Autrement dit, l'inadéquation entre intention et interprétation telles qu'elles sont comprises ici constitue déjà une définition du malentendu. Cette définition, appliquée à un échange en particulier, peut nous fournir un premier élément du *modus operandi* d'une analyse des situations de malentendu : l'analyse reposerait sur une enquête quant aux différences entre intention de communication et interprétation.

Pour décrire des situations de malentendu, il me paraît donc indispensable d'aborder la communication et l'usage des discours comme des actes, et de considérer leurs effets ; mais ce n'est pas suffisant, car j'ai également besoin d'une analyse du *contenu* des discours, pour pouvoir mettre en contraste le *sens* que donnent des interlocuteurs différents aux mêmes référents, c'est-à-dire pour pouvoir différencier les *points de vue*. Trognon s'intéresse précisément aux contenus dans son analyse de l'apprentissage dans l'interaction sociale : je vais donc m'intéresser plus particulièrement à ses travaux plutôt qu'à d'autres (pour une vue d'ensemble, voir p.ex. : Kerbrat-Orecchioni, 1990).

3.2.7 Une approche interlocutoire de l'apprentissage

La pragmatique de Trognon (2001) se destine spécifiquement à l'adresse de l'étude des processus d'apprentissage dans l'interaction, à l'intersection du cognitif, du social et de la communication. Trognon (1989, 1995, 1999, 2001) fournit de nombreux détails sur sa théorie de la conversation, notamment une formalisation de ce qu'est "apprendre de l'autre" et de la structure du débat (Trognon & Batt, 2003). De nombreux exemples empiriques de la démarche d'analyse de la logique interlocutoire sont disponibles, portant sur des conversations professionnelles (Kostulski & Trognon, 1997, 1998 ; Sannino, 1998 ; Sannino, Trognon, Dessagne, & Kostulski, 2001 ; Trognon et al., 2003 ; Trognon & Kostulski, 1996, 1999), des conversations en situations expérimentales (Schwarz et al., 2008 ; Trognon, Batt, B, Perret-Clermont, &

Marro, 2006 ; Trognon, Batt, & Laux, 2011 ; Trognon et al., 2010 ; Trognon, Sorsana, Batt, & Longin, 2008) et éducatives(Trognon, Batt, Schwarz, Perret-Clermont, & Marro, 2004).

Des travaux empiriques, j'aimerais reprendre ici les résultats de Trognon et al. (2010), qui sont particulièrement illustratifs des apports de la perspective interlocutoire développée par Trognon pour notre objet d'étude. Dans cet article, les auteurs analysent une interaction entre enfants sur un problème de mathématiques, et arrivent à un résultat qui illustre l'importance de l'analyse du raisonnement à travers l'interlocution à partir de traces langagières microgénétiques, afin de ne pas se tromper sur ce qui est réellement l'activité cognitive des enfants ayant reçu un problème à résoudre :

> *Il se pourrait donc que les enfants aient trouvé un procédé aboutissant au même résultat qu'une division tout en n'ayant pas fait (ou eu à faire) une division. D'une certaine façon, ce serait un abus de langage de leur attribuer à l'issue de cette interaction la connaissance de la division. En effet, pour résoudre le problème qui leur est posé, les enfants ont recours à un procédé moins élaboré cognitivement que celui qui est visé par le problème. Pourquoi donc les enfants se "casseraient-ils la tête" pour résoudre un problème qu'ils savent solutionner plus simplement ? Si notre hypothèse est juste, l'interaction aura mobilisé une heuristique plutôt qu'un algorithme. Il aurait fallu un problème ne pouvant être solutionné qu'avec des moyens nouveaux pour prouver l'efficacité de l'interaction dans l'acquisition de compétences nouvelles. Mais disons que l'interaction présentée ici ne permet pas de trancher sur la possession par les enfants de cette compétence.*
>
> *(Trognon et al., 2010, p. 152)*

J'aimerais également reprendre un deuxième exemple des travaux empiriques Trognon et collègues qui illustre comment une analyse de la conversation qui utilise l'interprétation des interlocuteurs peut donner à voir une pensée qui se construit dans la conversation. Schwarz et al. (2008) montrent comment un interlocuteur en reprenant le discours de l'autre, permet au locuteur de "comprendre" le problème cognitif qui leur a été posé. Ainsi, par un schème conversationnel, un jeu de langue, les interlocuteurs s'allègent l'un l'autre la tâche cognitive qui leur est dévolue.

Sur le plan théorique et méthodologique, je reprendrai de nombreux éléments. Voici en quelques mots la spécificité de cette approche selon son auteur :

> *A l'origine de l'ethnométhodologie, la thèse que la conversation constitue un domaine d'accomplissement des rapports sociaux remonte à une trentaine d'années, aux travaux de Garfinkel (1967) et a depuis donné lieu à de très nombreuses études empiriques (cf. pour une présentation de ce paradigme : Trognon, 1994). Au contraire, la thèse que la conversation constitue une matrice de la pensée (Trognon, 1993, 1997) n'a pas conduit à une égale productivité empirique, bien que son affirmation, sous la plume de Mead, de Vygotski et du "jeune" Piaget, date du milieu du siècle. En bref, bien que l'affirmation que la conversation est une matrice d'accomplissement des rapports sociaux et des cognitions ne soit pas une idée neuve, on doit noter d'une part son inégal développement dans les différents domaines des sciences humaines et sociales et d'autre part sa presque absence dans les diverses branches de la Psychologie. Le présent article n'a pas eu d'autre prétention que d'offrir une démarche d'analyse permettant d'étudier comment la dynamique de*

l'interlocution produit conjointement du social et du cognitif. Nous espérons en particulier qu'elle aura permis d'approcher plus qu'il n'est généralement fait les raisonnements "naturellement" mis en œuvre dans les interlocutions. Le raisonnement naturel est élaboré pas-à-pas par les interactants conjoignant leurs illocutions, c'est-à-dire construisant de la conversation.

Il se présente donc plutôt comme une dimension latente ou potentielle de la conversation que comme un phénomène directement accessible (Grusenmeyer & Trognon, 1996 ; Trognon, 1992, 1994). Pour l'exhiber, nous nous sommes autant que possible interdit d'importer dans les séquences des interprétations qui ne seraient pas accomplies matériellement par les interlocuteurs dans les enchaînements auxquels ils procèdent au cours de leurs prises de parole successives. Cette démarche revient à travailler avec une version particulière du principe de charité et consiste à n'imputer à un interlocuteur que les croyances qui rendent possibles l'enchaînement conversationnel qu'il effectue ; notre démarche rejoignant ainsi celle de l'Analyse Conversationnelle (Heritage, 1990 ; Levinson, 1983 ; Trognon, 1994 ; Trognon & Grusenmeyer, 1997). Il reste que nous avons abandonné l'Analyse Conversationnelle à partir du moment où nous avons essayé d'expliciter les raisonnements en tant que tels, c'est-à-dire de les dégager de leurs effectuations conversationnelles. Les formalisations auxquelles nous sommes parvenus sont évidemment des modèles d'observateurs. Rien ne prouve, bien sûr, que les interlocuteurs pensent ainsi et rien ne prouve, d'ailleurs, qu'ils dialoguent en pensant leurs discussions logiquement. Les explicitations formelles que nous avons tentées sont donc des "passages à la limite" des séquences. Elles n'en sont pas l'essence. Pour tenter d'exprimer les formalisations précédentes, nous nous sommes appuyés sur la logique propositionnelle. Rien ne prouve que nous avons fait le "meilleur choix". Mais il faut bien commencer par quelque chose et pour l'heure, nous manquons d'un appareil de description adéquat. Un tel appareil en effet devrait à la fois "pragmatiser" la logique et inversement "logifier" l'argumentation. Nous en sommes encore loin.

(Trognon, 1999, pp. 87-88)

Cette approche, avec laquelle j'ai eu l'occasion de mener des analyses (Kohler, 2010a), m'a permis d'acquérir les gestes indispensables à ma démarche d'analyse des situations de malentendu (voir chapitre 5, section 5.2.4, p. 359 et suivantes) articulant pensée et communication, notamment en reprenant ces principes méthodologies énoncés par Trognon :

— la potentialité d'une "matrice de la pensée" (Trognon, 1999, pp. 87-88) dans l'interaction singulière qui est analysée, en complémentarité avec la fonction expressive du discours ;

— aborder le raisonnement comme une dimension latente de l'enchaînement conversationnel ;

— user du principe de charité avec la plus grande parcimonie, n'attribuant à un interlocuteur "que les croyances qui rendent possibles l'enchaînement conversationnel qu'il effectue" (*ibidem*) ;

— viser la description des raisonnements effectués sur le langage, les "effectuations conversationnelles" (*ibidem*).

J'ai par contre fait un autre choix que celui de la logique propositionnelle pour expliciter mes analyses, optant pour la logique naturelle de Grize pour des raisons que j'explique brièvement ici, et reprends plus loin, au moment de présenter la logique naturelle (voir section 3.3.1, p. 159 et suivantes). Il convient de

préciser que cette divergence porte uniquement sur le choix du métalangage utilisé pour décrire le sens que construisent les interlocuteurs au cours de leurs échanges, et que ce choix a été particulièrement difficile.

Trognon et al. (2010) présentent comme un "truisme" le fait que l'être humain a comme milieu naturel la conversation ("talk-in-interaction") et invite, dès lors, à une psychologie concrète qui redécouvre ces phénomènes (language, raisonnement, affectivité...) par l'étude de la conversation. Par contre, il souligne dans ces lignes la difficulté de cet objectif : si la production de traces des recherches empiriques invite à cette psychologie concrète, cela n'en fournit pas pour autant les moyens pour leur analyse :

> *Cependant, des progrès semblables n'ont pas été accomplis en matière d'analyse des données, car comme l'écrivent Wertsch et Sammarco (1988 : 411) le fait de posséder de nombreuses données prouvant l'influence bénéfique de l'interaction dans l'acquisition "ne résout pas encore le problème des mécanismes qui font la transition entre le fonctionnement interpsychologique et le fonctionnement intrapsychologique".*
>
> *(Trognon et al., 2010, p. 132)*

Trognon identifie deux conditions pour résoudre ces problèmes : premièrement, associer aux mesures de performances des données, par exemple des discussions, de leurs microgénèses ; et deuxièmement, "concevoir un langage formalisant dans le détail l'accomplissement du raisonnement dans l'interlocution" (Trognon et al., 2010, p. 132). Ainsi, la logique des prédicats a surtout fonction de métalangage, dans cette approche. Je comprends l'importance d'un tel métalangage, mais préfère choisir celui de la logique naturelle pour l'objectif qui est le mien. En effet, s'intéresser aux malentendus consiste, dans notre démarche, à s'intéresser à des moments particuliers - critiques - de la microgénèse des connaissances ou performances des élèves, et si je suis convaincu qu'il faut concevoir et mettre en œuvre une description des raisonnements accomplis dans l'interlocution, je reste réservé sur le fait qu'une telle description devrait être un langage formel comme celui de la logique des prédicats.

En effet, mon objectif n'est pas de modéliser les raisonnements, mais de procéder à l'identification et la description de divergences entre les points de vue. Le métalangage choisi devrait permettre de restituer l'ambiguïté des significations que reconstruisent les interlocuteurs au moment où les élèves et l'enseignant font usage du langage à leur disposition, plutôt que constituer une métalangue où la formalisation vient combler cette ambiguïté par une interprétation du chercheur.

En particulier, nous souhaitons décrire le raisonnement naturel à travers des traces langagières en gardant la dynamique de l'élaboration cognitive ; or, la formalisation à l'aide d'une logique des prédicats transforme les énoncés en propositions qui deviennent, de ce fait, atemporels. Il s'ensuit que l'analyste perd non seulement les formes inachevées de raisonnement, mais aussi procède à diverses inversions du sens du déroulement tel qu'il est présent dans les traces langagières (Grize, 1996, pp. 11-18). Il faut néanmoins nuancer ces propos relativement à la Logique Interlocutoire, qui est conçue comme une logique dynamique et se base sur la *déduction naturelle* s'attachant "à présenter les raisonnements, conformément à l'intuition

et à l'expérience, comme des enchaînements de propositions, des constructions progressives (...) au fur et à mesure de l'introduction des énonciations" (Kostulski & Trognon, 1998, p. 62).

Pour montrer la proximité des approches, voici un passage où Kostulski et Trognon s'ancrent explicitement dans une approche de logique naturelle :

> *De plus, nous analysons des raisonnements communiqués au travers de l'usage du langage. Nous devons pouvoir prendre en compte, dans nos analyses, l'objectif, la situation et le contexte de production des opérations de pensée : en effet, nous analysons non pas ici des opérations logiques mais des opérations logico-discursives produites en contexte. C'est pourquoi nous nous situons dans le cadre de la logique naturelle (Grize, 1987). La logique naturelle désigne les raisonnements dans lesquels "les contenus sont interprétés par celui qui les traite". Cette interprétation est guidée par les contextes dans lesquels ils sont exprimés, par les situations auxquelles ils réfèrent et les objectifs poursuivis. La logique naturelle est l'ensemble des opérations de pensée qui permet de raisonner à l'aide de la seule langue naturelle, opérations qui peuvent être appelés à juste tire logico-discursives. Elle relève de la logique ; elle a donc un caractère universel, mais dépend également de la langue ; elle prend donc en charge l'existence des sujets énonciateurs et les situations d'interlocution.*
>
> *(Kostulski & Trognon, 1998, pp. 66-67)*

Il ressort de ce passage que la théorie interlocutoire développée par Trognon complète celle traitant des opérations de pensée de Grize. Il existe un autre point de convergence entre la pragmatique de Trognon et la sémiotique de Grize : tous deux abordent les représentations sociales à travers le processus de communication (Grize, 1993 ; Trognon & Larrue, 1988a), à la fois comme constituées par le processus de communication et comme résultats, représentations communes permettant la communication [168].

Ceci concerne de très près la question du malentendu, puisque c'est bien une divergence entre ces représentations qui nous permettra de définir le malentendu au niveau des contenus. Trognon s'intéresse à la conversation en tant que "dispositif naturel de partage des représentations", et cette recherche fait de même tout en se focalisant plus précisément sur les moments critiques où ce "partage" subit quelque incident critique [169].

Par ailleurs, Trognon déclare explicitement - comme Grize - que son approche est dialogique, la définissant comme une "interprétation dialogique de la théorie des actes de langage" (Kostulski & Trognon, 1998, p. 60). Comme Kostulski et Trognon s'intéressent surtout aux structures de la conversation, déclarant que "la structure argumentative d'une conversation est isomorphe à sa structure logique" (*idem,* p. 61), la dimension dialogique est conçue comme le mode d'expression des raisonnements prenant une

168. Elles forment un "cadre convenu" chez Trognon, des "préconstruits culturels" chez Grize.

169. En procédant ainsi, j'élargis le sens que prend "conversation" à l'ensemble des échanges dans une classe en milieu scolaire. Cet extension de la notion est à dessein : une transaction éducative composée d'un discours d'enseignement frontal dispensé par l'enseignant, puis suivi de réponses à des exercices ou épreuves écrites constitue à mon avis une *conversation* - certes très particulière puisqu'elle a lieu partiellement en différé et par écrit - mais dont le fonctionnement et les processus sont mieux expliqués par la pragmatique et l'interlocution que par la grammaire ou toute autre approche normative et/ou formelle du langage. En outre, depuis l'usage massif des nouvelles technologies, les conversations étalées dans le temps et partiellement à l'écrit et à l'oral sont devenues courantes dans les pratiques quotidiennes.

forme argumentative dans la conversation. En ce sens, la dimension dialogique fait référence à un processus d'émergence par et dans le dialogue des raisonnements des interlocuteurs, et a une conséquence à la fois sur le résultat du processus qui constitue les traces conversationnelles - la structure constituée est dialogique - et sur la manière d'analyser ces traces, où, typiquement, il faut un troisième tour de parole pour établir le sens du premier selon la perspective du locuteur (Trognon & Larrue, 1988b).

Cependant, il demeure à mon sens un point de divergence que toutes les convergences soulignées ci-dessus ne permettent pas de résoudre. Dans ses formalisations du contenu cognitif, la logique interlocutoire utilise la logique des prédicats. Or, il s'agit typiquement d'une logique formelle dont Grize (1982) présente les limites. Les auteurs cités discutent explicitement ce problème :

> *La logique formelle a pour but de caractériser des énoncés de la langue naturelle sous forme logique, c'est-à-dire en structures d'énoncés élémentaires qui ont une valeur de vérité évaluable. Nous utilisons plus particulièrement la logique des Prédicats. Elle est caractérisée par l'emploi de prédicats et de variables et permet d'établir la validité d'un raisonnement sur la seul base de la forme de ses prémisses. Si elle est utilisée pour évaluer la validité des raisonnements, notre propos ici n'est pas d'évaluer les inférences réalisées en conversation par les personnels soignants mais de les modéliser, d'en rendre compte, et nous l'utiliserons ici comme syntaxe des phénomènes cognitifs et considérerons comme Grize (1987) qu'en logique naturelle, est vrai un énoncé qui schématise quelque chose qui est le cas. Selon notre perspective, les raisonnements produits sont* a priori *valides, et leur non-validité logique - nous le montrerons plus tard - n'induit pas leur non-pertinence pragmatique.*
>
> *(Kostulski & Trognon, 1998, pp. 64-65)*

Ainsi, je dirais qu'il en va de la logique des prédicats dans la logique interlocutoire comme de la logique de Boole chez Piaget (voir à ce sujet : Apostel, Grize, Papert, & Piaget, 1963) : il s'agit d'un usage atypique de la logique des prédicats communément employée, de telle sorte que d'un côté elle échappe en partie à la critique du fait d'un usage particulier et particulièrement ouvert [170], et de l'autre elle ne constitue cependant pas l'instrument spécifiquement conçu pour une logique naturelle. C'est donc son usage que je trouve particulièrement pertinent chez Trognon, et que je reprends pour les analyses effectuées dans cette recherche, avec la théorie socio-cognitive de la conversation, ou "interaction conversationnelle" (Trognon, 1999 ; Trognon & Kostulski, 1999), à savoir son approche de l'interlocution permettant d'intégrer les dimensions cognitive et sociale.

La théorie socio-cognitive de Trognon part d'un intérêt porté à l'interaction elle-même, plutôt qu'à ses fonctions, et se base sur une conséquence psychologique de la théorie des actes de langage :

> *La définition de l'acte de langage comme l'application d'une force sur un contenu propositionnel revient à le constituer comme une action sociocognitive, ce qui est d'un grand intérêt en psychologie.*
>
> *(Trognon & Kostulski, 1999, p. 310)*

170. Ouvert au sens de système ouvert, c'est-à-dire par opposition à un système fermé comme l'est - en principe - toute logique formelle.

Cette conséquence est tirée du fait que dans la définition des actes de langage (ici selon Searle & Vanderveken, 1985), ceux-ci ont deux composante : des *forces illocutoires* s'appliquant sur des *contenus propositionnels*. Ces composantes définissent des conditions de succès - pour la réalisation des forces illocutoires - et des conditions de satisfaction, qui sont des conditions de vérité.

Nous reprendrons donc de la pragmatique les objets de l'interlocution, tels que définis par Trognon et Kostulski (1999) :

— les transaction, combinaisons de structures qui représentent l'ensemble de la conversation ;

— les structures, combinaisons de composants micro qui réalisent une intentionnalité discursive (Searle, 1991), par exemple un débat ;

— les échanges, structure micro de quelques interventions qui constitue la plus petite unité de l'interlocution, et qui peut contenir des échanges subordonnés ;

— les interventions, généralement constituées d'un seul tour de parole, ou plus précisément d'un acte de langage, simple ou complexe (Ghiglione & Trognon, 1993).

A partir de ces quelques éléments, Trognon définit son approche pragmatique par deux postulats que nous reprendrons à notre charge pour aborder l'interlocution dans nos analyses :

> *La thèse fondamentale de la logique interlocutoire est que tout interlocution constitue un phénomène sociocognitif porté par l'architecture qu'elle s'assigne pour objectif de décrire. Pour ce faire, elle postule :1) que les événements sociocognitifs sont portés dans l'interlocution tant par les éléments qui entrent dans ces composants que par l'architecture de l'interlocution. Les éléments de l'interlocution, quelle que soit leur taille, simple ou complexe, microscopique ou macroscopique, doivent alors pouvoir s'interpréter à la fois en tant que relations sociales et en tant que faits cognitifs (Trognon, 1995 ; Trognon & Kostulski, 1996). L'organisation dont résulte la combinaison des éléments doit pouvoir s'interpréter sur ces deux dimensions ;2) que, puisque l'interlocution est fondamentalement un processus, c'est en terme de processus que doivent s'analyser les domaines social et cognitif de l'interlocution.*
>
> *(Trognon & Kostulski, 1999, p. 311-312)*

Si, dans notre recherche, il est bien difficile de présumer de la satisfaction des contenus propositionnels qui nous intéresse - des jugement en physique - il me paraît en revanche nécessaire de compléter [171] la théorie de la communication de Grize.

171. En effet, au risque d'anticiper sur la suite de mes propos, je dois préciser ici que Grize ne reprend pas la théorie des actes de langage en tant que telle. Cependant, la thèse principale de cette théorie, consistant à souligner l'aspect *performatif* du langage, semble être partie prenante de la théorie de la communication de Grize. En effet, il est considère que communiquer constitue un *acte*, et utilise dès lors le concept d'*acte de communication* : il écrit, par exemple "le raisonnement comme acte de communication" (Grize, 1996, p. 107). Grize rencontre plutôt le problème de la formalisation dans des théories de l'argumentation qui s'intéressent au contenu cognitif à partir d'une logique formelle, comme celle du modèle de Toulmin qui ne lui convient pas pour ses objectifs. En effet, un modèle formel permet de juger de la qualité des arguments - en référence à une norme - et constitue un autre champ de recherche que celui qui a pour objectif de faire apparaître certaines formes de la pensée naturelle, dont (Grize, 1996, p. 107) donne l'exemple du "raisonnement transductif". Ces objectifs semblent s'exclure mutuellement.

Trognon, de son côté, choisit les actes de langage comme composants de base d'une conversation avant tout pour leur intentionnalité, en sans pétition de principe en faveur de l'une des diverses théories des actes de langage.

> *Puisqu'une conversation élabore un rapport au monde (au monde interactionnel et au monde tout court), c'est-à-dire engendre une structure de contenus informatifs-représentationnels, bref de l'intentionnalité et puisque celle-ci émerge progressivement au cours d'une séquence d'énonciations (Roulet 1992), les composants d'une conversation doivent d'une manière ou d'une autre "réfléchir" de l'intentionnalité. C'est là, selon nous, la raison principale qui milite en faveur du choix de l'acte de langage comme composant de base d'une conversation. (...) Bien entendu, le fait de recourir à l'acte de langage ne nous engage pas sur une théorie particulière des actes de langage : a priori n'importe quelle théorie ferait l'affaire (celle de Sperber et Wilson 1989, aussi bien que celle de Searle 1982), pour autant qu'elle propose une théorie des énonciations restituant leur intentionnalité. Le choix entre telle ou telle théorie des actes de langage est une question empirique.*
>
> *(Trognon, 1995, p. 86)*

L'auteur va jusqu'à se poser la question, dans la conclusion d'un article, de la nécessité de l'édifice théorique des actes de langage pour étudier l'apprentissage dans la conversation et pour une théorie de l'interlocution :

> *"Étant donné que l'interlocution n'est pas la conversation, étant donnée qu'il est généralement nécessaire de supputer du cognitif pour se faire une idée de la rationalité d'une intervention réactive, notre question initiale devient celle-ci : une théorie des actes de langage est-elle ou non un composant nécessaire ? Le raisonnement doit-il nécessairement passer par une théorique des actes de langage ?"*
>
> *(Trognon, 1989, p. 146)*

Pour cette recherche, je n'ai pas besoin de la théorie des actes du langage au-delà de ce que la démarche de la pragmatique conversationnelle de Trognon en fait : considérer les *interventions* des interlocuteurs comme des actes.

3.2.8 Une approche socio-culturelle de l'apprentissage

Aux approches de filiation piagétienne abordées jusqu'ici, s'ajoutent des idées issues de l'approche socio-culturelle de l'*apprentissage situé*. Cette approche aborde l'apprentissage comme une *participation*[172], ce qui permet de mettre en évidence l'importance de la dimension temporelle pour comprendre le phénomène de l'apprentissage :

172. Si la proposition initiale de l'*apprentissage situé* ("situated learning") comme *participation à une communauté de pratique* (Lave & Wenger, 1990) met surtout l'emphase sur la dimension sociale de l'apprentissage, les travaux plus récents que je cite dans le texte peuvent être lus comme le prolongement de cette théorisation : en effet, déjà dans la théorisation d'une participation d'abord périphérique puis de plus en plus centrale à une communauté, la dimension temporelle de ce mouvement vers la centralité constitue une dimension essentielle de l'approche située.

> *Overall, we highlight that learning occurs when different timescale meet and intersect, and meaning potential becomes transformed to common objects (physical and discursive). The combination of such processes and objects is what constitute learning. Here the vertical and horizontal dimension meet in the unfolding trajectories' of participation. One might say that learning is motion shaped by different types of practices and stabilised by the stances that is taken by the actor and tools and artefacts (Nespor 1987 : 131 ; Krange in press). Hence, one way to conceptualise learning is to say that learning occurs when you get stabilising out of flux or what we can label gap-closing. This conception of learning brings to the fore that time is as critical factor in interactional ordering of different types of knowledge and competencies for creation of new stabilities.*
>
> *(Ludvigsen, Rasmussen, Krange, Moen, & Middleton, 2010, p. 11)*

Dans cette approche, l'apprentissage y est considéré comme un continuum, un *flux* (Ludvigsen et al., 2010) au cours duquel des processus plus ponctuels permettent aux élèves de s'approprier des connaissances et des outils, notamment en mettant en relation leurs actions propres avec des objets (objets concrets, mais aussi objets de discours ou de pensée).

Le concept de *trajectoire*[173] (Ludvigsen et al., 2010) de cette approche socio-culturelle permet d'opérationnaliser les *situations de malentendu* comme des "accidents de parcours" ou *incidents critiques* (voir p.ex. : FitzGerald, Seale, Kerins, & McElvaney, 2008 ; Flanagan, 1954 ; Hughes, Williamson, & Lloyd, 2007) au cours de ces *trajectoires*. Cette approche fournit à ma recherche une méthodologie, focalisée sur l'identification d'incidents critiques dans les trajectoires de participation des élèves à la schématisation de la physique de la classe.

Dans l'approche socio-culturelle, les travaux de Mercer (2004) sont exemplaires d'une analyse du discours (qualitatif et quantitatif) des interactions en classe qui "vise la description des usages de la langue en tant que mode de pensée"[174]. Cette approche met notamment en évidence le triplet minimal d'un échange, qui je reprendrai pour mes analyses :

1. Initiation.
2. Réplique.
3. Quittance[175].

Ce triplet est indispensable à l'analyse de la manière dont un interlocuteur interprète une intervention dans l'interaction : ce n'est qu'au troisième tour de parole que la signification du premier (l'*initiation*), signification singulière dans cet échange particulier, peut être inférée (voir à ce sujet : Trognon & Larrue, 1988a). En voici un exemple *a minima* avec une communication non verbale :

173. (Ludvigsen et al., 2010, p. 3) définissent *trajectoire* ainsi : "The trajectory can be seen as a process of connected phases where there are individual differences, but common features of what to expect.". L'écart entre "différences individuelles" et "aspects communs" constitue justement le champ d'investigation d'éventuelles *situations de malentendu*.
174. Traduit par l'auteur de "which focuses on the use of language as a social mode of thinking".
175. Traduit des termes anglais *initiation*, *response* et *feedback* de (Mercer, 1995, p. 29).

1. Le premier fait un signe de main pour dire (a) "bonjour" ou (b) "au revoir"- l'*initiation*.
2. L'autre fait mine de partir - la *réponse*.
3. Le premier (a) s'agite et s'inquiète pour communiquer que ce n'était pas un au-revoir ou (b) continue son signe de main, sourit, etc. - la *quittance*[176].

Cette idée suscite aussi, en lien avec les travaux d'analyse littéraire de Bakhtine Todorov (1981), la mise en évidence d'une appropriation d'une multiplicité de *voix* au cours du développement, dimension de l'apprentissage qui a donné vie au *dialogisme*, une approche que j'aborderai dans la prochaine section.

3.2.9 Une approche dialogique de la subjectivité

Les approches faisant usage du terme *dialogique* ou se référant au *dialogisme* (voir p.ex. : Dascal, 1985 ; Jacques, 1985 ; Linell, 1998 ; Marková, 2007 ; Salgado, Cunha, & Bento, 2013 ; Suthers, Lund, Rosé, Teplovs, & Law, 2013), présentent des spécificités et ne définissent pas toujours ces termes de manière identique (Grossen, 1999 ; Grossen & Orvig, 2011 ; Wegerif, 2008, 2011a). Par exemple, Marková (2013) distingue *Dialogism* et *Dialogicality*, tout en signalant que Bakhtine utilisait les deux termes de manière interchangeable. Pour Marková et Linell (2009), *dialogism* désigne les épistémologies inspirées des travaux de Bakhtine, alors que *dialogicality* prend un sens plus spécifique, socio-psychologique ou langagier plutôt que philosophique, et fait référence à la capacité humaine de s'engager socialement, mentalement et en communication avec autrui.

Dans cette recherche, je reprends notamment le *dialogisme* en tant que postulat épistémologique, tel que le définit Marková (2013) :

> *Without denying cognitive faculties of the individual, dialogical approaches assume that knowledge and language are generated from interaction between the self and others ; they are multifaceted and heterogeneous. (...)*
>
> Dialogism *refers to epistemologies of human and social sciences that are based on Bakhtin's perspective according to which knowledge, language, systems of signs and symbols, artistic products, and many other activities are jointly generated by the self and others. This contrasts with monologism, that is, with traditional or foundational epistemologies that conceive of knowledge and language in terms of a single knower and an object to be known.(Marková, 2013, p. 10)*

Le dialogisme met en évidence le fait que la pensée n'est pas forcément la pensée d'un individu, et même lorsqu'elle est pensée d'un individu, cette pensée se construit dans le dialogue avec des alter - imaginaires ou réels - qui permettent le *dialogue*, processus fondamental de l'activité même que je nomme un peu simplement *pensée* au cours de cette recherche. Sans entrer ici dans le détail de l'argumentaire justifiant cette conception de la pensée, je cite cette approche pour mettre en évidence mon adhésion à

176. Nous avons préféré traduire "feedback" par "quittance" au sens où l'initiation est validée (ou pas), quittancée (ou pas), également dans le sens où les interlocuteurs "sont quittes" l'un de l'autre : l'alternance des tours de parole a été respectée et est considérée égale, et ils peuvent "quitter" l'échange dont le cycle minimal est accompli - on dira dans la théorie des actes du langage que l'acte est *satisfait*, même s'il n'est pas forcément *réussi* dans l'option (a).

cette idée fondamentale que la pensée se construit et se met en mouvement dans et par le dialogue, qu'il soit réel dans une interaction sociale, ou imaginaire et intériorisé. Cette idée va d'ailleurs de paire avec une position, en philosophie des sciences, qui fait de la science un ensemble de savoirs argumentés plutôt que des savoirs révélés sur les prétendues "lois de la nature" [177].

L'adoption de ce postulat épistémologique au problème de l'apprentissage (pour une brève introduction à l'approche dialogique des processus d'apprentissage, voir : Grossen, 1999) est l'une des raisons de ma focalisation sur le processus d'intercompréhension et les situations de malentendu. Les travaux de cette approche mettent souvent l'accent sur ces moments particuliers, p.ex. :

> *Be this teacher-pupil interaction, or teacher's negotiation with an immigrant parent - it is in these small fits and misfits of social understanding through which human psychological development becomes co-constructed. (...)*
>
> *Surprises, departures from the expected, and the moments of nonunderstanding are not aberrations but constitute the rich points - moments where new meanings are emerging (see Hill-Bonnet et al., this volume, Chapter 10).*
>
> *(Valsiner, 2013, p. XI)*

Étudier l'apprentissage à travers cette communication entre pairs et entre enseignants et élèves consiste, selon ce postulat du dialogisme, à investiguer le lieu de la construction de la connaissance. Il est peut-être utile de préciser que même un discours monologique (au sens de la linguistique) peut être étudié dans une approche dialogique, car il peut être considéré comme un dialogue en ce qu'il s'adresse à un interlocuteur, reprend d'autres voix et les prolongent ou les discute. Nous avons vu que se centrer sur les processus de communication équivaut à choisir d'observer ces processus mêmes qui sont à l'origine des connaissances dans leur développement historico-culturel et dans leur développement ontogénétique. Une telle étude des processus de communication nécessite une approche dialogique, puisque étudier les processus de communication équivaut à se centrer sur l'échange entre interlocuteurs des échanges plutôt que sur ce qui reste chez l'individu après un éventuel processus d'intériorisation, ce qui permet notamment de relever l'influence du contexte institutionnel sur les processus d'apprentissage (sur ce problème, voir p.ex. : Grossen & Perret-Clermont, 1997).

L'adoption d'une approche dialogique (pour une définition détaillé, voir p. ex. : Grossen, 2010) a de nombreuses conséquences pour cette recherche. J'en citerai deux parmi les plus importantes.

Premièrement, elle m'a permis d'aborder l'analyse des interactions verbales sans forcément vouloir attribuer les connaissances construites dans les interactions à un élève ou un autre : en mettant en évidence le rôle fondamental du dialogue dans la construction de la pensée, l'approche dialogique m'a donné la liberté - lorsque c'est pertinent dans le contexte des traces analysées - de considérer que les connaissances

177. Je discuterai de ce malentendu quant à la nature de la science, qui implique tout particulièrement Newton et sa physique, dans la discussion à la fin de la recherche (voir section 8, p. 709 et suivantes), en montrant que même pour la physique une posture monologique plutôt que dialogique est intenable, si l'on ne considère ne serait-ce que les fluctuations historiques et les problèmes de communication et de mise en forme des savoirs scientifiques, et de leur transmission d'une génération à l'autre.

construites dans un échange entre élèves constituent une construction collective. Ce regard sur ce qui se passe dans une interaction entre élèves, typiquement lorsqu'ils travaillent en petits groupes sur une même tâche, a plusieurs conséquences :

— aux connaissances observées dans le discours produit collectivement à l'occasion d'un échange ne correspondent pas toujours des connaissances antérieures de même contenu pour au moins un des membres du groupe : elles peuvent être construites à l'occasion même de l'échange ;

— les élèves ne s'approprient pas forcément individuellement ce qu'ils parviennent à schématiser ensemble lors des échanges du groupe ;

— les échanges en groupe peuvent constituer un moment, voire le point de départ, d'une réflexion qui déborde l'espace temporel de l'échange et conduit un élève à prendre une position ou construire des connaissances de manière convergente ou divergente de ce qui est schématisé lors des échanges [178].

Je me permettrai ainsi, au cours des analyses, et lorsque les traces et le contexte de leur enregistrement l'exigent, de considérer une schématisation comme le processus et le produit d'un groupe, et non systématiquement comme l'indicateur de représentations ou points de vue individuels. Grossen (2010) explique les fondements de cette redéfinition des unités d'analyse :

> *On a theoretical level, I showed that adopting a dialogical approach goes together with a redefinition of the classical objects of psychology and implies (a) working on interaction and interlocution, and not on individual productions ; (b) considering the fundamental social dimension of human beings by accounting for multivoicedness and heteroglossia ; (c) studying individuals in the context of their activity ; (d) integrating the role of semiotic and physical tools in our observations. In this view, interaction analysis is theoretically grounded on a conception of the subject who is in interaction with other subjects and objects, and who is fundamentally heterogeneous. On a methodological level, I reported some examples of analytical tools which aimed at following dialogical principles. I showed that adopting a dialogical perspective goes together with a change of the unit of analysis which has to be taken into consideration in order to account for human behaviour and discourse. However, I also showed that sticking to micro-interactional processes is too reductive because any interindividual interaction includes direct or indirect reference to absent (or imaginary) social actors, and because the heterogeneity of discourse in terms of multivoicedness and heteroglossia implies the presence of Others.*
>
> *(Grossen, 2010, p. 20)*

178. Autrement dit, "l'histoire continue" au-delà du dialogue réel, et sous une forme dialogique néanmoins. Les travaux centrés autour du concept de Soi Dialogique (Hermans & Hermans-Konopka, 2010 ; Hermans, Kempen, & Loon, 1992 ; Ligorio, 2010 ; Ligorio & César, 2013 ; Linell & Marková, 2014) soutiennent cette idée d'un lien fort entre les positions expérimentée et réalisée par les interactions et la construction d'une identité personnelle. En suivant ce modèle, un dialogue entre élève à un moment donné de leur histoire peut les conduire dans un processus de pensée qui les emmène, plus tard, sur des positions diverses et variées sur le même objet : c'est néanmoins ce dialogue réel qui, s'il est à l'origine du mouvement de pensée, a initié leurs cheminements individuels.

Deuxièmement, l'idée dialogique est à l'origine du pari initial de la recherche, considérant qu'il était possible de mettre l'accent dans l'analyse à la fois sur l'intersubjectivité et sur une construction des connaissances. Grossen (1999) souligne l'enjeu de cette articulation :

> *Par rapport aux approches monologiques qui constituent la majeure partie du champ de la psychologie, l'approche dialogique, on l'a vu, a pour spécificité de mettre l'accent sur l'intersubjectivité. Mais cela signifie-t-il pour autant qu'il faille éluder la question de l'*intra*subjectivité (Valsiner, 1997) ? Autrement dit, comment intra- et intersubjectivité s'articulent-elles ? Cette question me semble essentielle si l'on veut éviter de passer d'un réductionnisme psychologique à un réductionnisme social.*
>
> *(Grossen, 1999, p. 26)*

Si le défi de l'articulation entre intra- et intersubjectivité peut être clairement posé dans l'approche dialogique, celle-ci ne fournit pas forcément les moyens de cette articulation, qui pose de nombreuses questions d'ordre méthodologique (voir p.ex. : Gillespie & Cornish, 2014). Pour discuter de ce problème d'ordre méthodologique, je ne prendrai comme exemple de cette littérature que le travail de Linell (1995), qui aborde explicitement la question du malentendu.

Linell (1995) met en évidence les multiples facettes et les couches multiples ("multi-layered and multi-faceted", p. 183) du processus d'intercompréhension et du phénomène de malentendu. Son approche le conduit à formuler la remarque suivante, concernant la théorisation du phénomène de malentendu et de construction du sens par les personnes :

> *The mind as a a sense-making system. A general theory of human sense-making must be action-based. James Wertsch (1998) proposes that the mind be construed as action. We create meaning by interacting with others and the world. Sense-making is strongly interactive and contextual.*
>
> *(Linell, 2009, p. 12)*

Ces principes contribuent à la construction d'une perspective sur les processus d'apprentissage, et oriente mon choix pour une logique représentant le cheminement des élèves au cours de leur apprentissage qui est une logique de l'action (voir section 3.3.1, p. 159 et suivantes), plutôt qu'une logique formelle. Ils nous aideront également à définir ce qu'est une *situation* dans cette étude des *situations de malentendu*, en fin de chapitre.

Dans son article, Linell (1995) se focalise sur la différenciation de différents types de malentendu. Son analyse le conduit à faire de nombreuses distinctions [179] :

— le *malentendre* ("mishearing") reprend les accidents dans le processus d'écoute ou de décodage ;

— la *malcommunication* ("miscommunication") fait référence à ces "moments inconfortables" (*idem,* p. 187) lorsque la communication échoue, qui nous intéresse particulièrement dans cette recherche ;

179. La traduction française étant difficile, j'ai systématiquement ajouté les termes anglais utilisés par l'auteur.

— la *malreprésentation* (“misrepresentation”) fait référence aux divergences de représentation d’un référent, par le discours, et fait le lien avec la question des connaissances ou des savoirs ;

— le *malentendu* (“misunderstanding”), qui est l’autre pôle de l’intercompréhension entre des interlocuteurs réels en interaction, qui n’est jamais complètement “correcte et complète” selon Linell (*idem,* p. 181).

Cette catégorisation des malentendus de (Linell, 1995, p. 188) est basée sur (1) leur traitement par les interlocuteurs ou tentative de résolution, (2) sur leur origine, et (3) sur les objets sur lesquels ils portent. Les deux critères me sont souvent apparus indécidables dans la pratique des analyses des traces en milieu scolaire. Le troisième critère, par contre, m’a paru applicable à cette recherche. J’ai donc tenté, dans un premier temps, de procéder dans une démarche typologique.

J’ai rencontré une première difficulté pour caractériser *les objets du malentendu*. En effet, si la typologie de Linell permet de faire la différence entre des processus de décodage, entre l’échec de la communication et des représentations (discursives ?) divergentes entre les interlocuteurs, elle fait du malentendu une dimension de la communication humaine plutôt qu’un moment particulier, un événement critique à étudier. En outre, le concept de “représentation” ne permet que d’envisager le rapport aux connaissances, mais celles-ci ne sont pas spécifiées [180].

En complétant sa démarche avec la logique naturelle, j’ai opté pour une typologie basée sur les lieux de malentendu. Par exemple, les malentendus portant sur l’identité des mots utilisés est ouverte à la question de la sémantisation que nous avons abordée à travers le concept grizéen de classe-objet. Les malentendus portant sur la référence sont analysés selon la théorie du signe de Grize selon qu’il s’agit de signification, dénotation ou encore désignation. L’intentionnalité dont parle Linell se retrouve chez Grize dans la notion de finalité de la schématisation, et certains aspects comme l’attitude émotionnelle ne sont pas abordés séparément dans notre approche mais se retrouve à travers la schématisation elle-même. Ceci a l’avantage de nous permettre de travailler à partir d’un seul canal (la schématisation et ses opérations constitutives) pour faire des hypothèses sur ce que sont ces objets de malentendu, au lieu de se référer à des dynamiques émotionnelles extérieures au discours.

Cependant, j’ai ensuite abandonné cette démarche consistant à procéder par typologie [181], car la classification des situations de malentendu m’est apparue secondaire par rapport au problème de leur descriptions détaillées, permettant justement la reconstruction par le chercheur des divergences entre les points de vue des interlocuteurs, selon le sens qu’ils donnent aux discours dans leur pratique de communication, singulières et situées. De son côté, Linell reconnaît aussi “la relation inextricable” entre *misrepresentation* (“malreprésentation”) et *malentendu* [182]. Or, c’est justement cette relation qui nous intéresse dans cette recherche. Cette relation n’est pas expliquée plus précisément dans la typologie de Linell.

180. Pour spécifier ces connaissances, Linell (1995) ne fait référence qu’à une *quantité* (“amounts”, p. 179).
181. Voir la première version de cette thèse, soumise en 2014.
182. Traduit de l’anglais : “There is an inextricable relationship between “misrepresentation (misleading expression) and “misunderstanding”.” (Linell, 1995, p. 181).

Sur ce point particulier, l'approche dialogique ne fournit pas tellement de propositions méthodologiques [183] permettant des analyses microgénétiques du contenu des points de vue des divers interlocuteurs. Ainsi, j'ai besoin de réflexions plus précises quant à l'articulation entre langage et pensée effectuée dans et par l'activité du dialogue pour m'équiper dans cette recherche, et permettre une analyse des divergences selon les points de vue.

Approche socio-culturelle, pragmatique conversationnelle et approche dialogique se rejoignent dans leur focalisation sur les usages du langage et son importance dans la construction de la pensée. Cette articulation entre pensée et langage, cependant, est particulièrement difficile à aborder en recherche : que faut-il observer, et à quel échelon, pour pouvoir mettre en évidence ces processus fondamentaux dans la construction des connaissances qui font usage du langage et s'effectuent éventuellement dans et par la communication ? Vygotski aborde ces questions dans son approche historico-culturelle : je vais à présent discuter ce que je reprends de cette approche pour ma recherche.

3.2.10 Une approche historico-culturelle du langage et des instruments

Vygotski explicite, dans les premières lignes de *Pensée et langage*, le problème de l'articulation entre le cognitif et le langage, et il le désigne comme ce qui échappe à l'attention des chercheurs - ce que j'ai appelé une *tache aveugle* - dans un passage que je reprends ici pour expliciter certaines difficultés auxquelles cette recherche me confronte aussi :

> *Le problème de la pensée et du langage fait partie de ces problèmes psychologiques qui mettent au premier plan la question du rapport entre les différentes fonctions psychiques, entre les différentes formes d'activité de la conscience. L'élément central en est, sans aucun doute,* le rapport entre la pensée et la parole. *Toutes les autres questions qui se rattachent à ce problème apparaissent comme secondaires et logiquement subordonnées à cette première et fondamentale question et, tant que celle-ci n'est pas résolue, on ne peut même pas poser correctement chacune de celles, plus particulières, qui suivent. Cependant le problème des liaisons et des rapports interfonctionnels, si étrange que cela soit, est justement pour la psychologie moderne un champ nouveau et presque totalement en friche.*
>
> *Le problème de la pensée et du langage - aussi ancien que la science psychologique elle-même - est sur ce point précisément, la question du rapport entre pensée et parole, le moins étudié et le plus obscur. L'analyse atomistique et fonctionnelle, qui tout au long des dix dernières années prédominait dans la psychologie scientifique, a conduit à examiner isolément les différentes fonctions psychiques, à élaborer et perfectionner une méthode de connaissance psychologiques correspondant à cette étude des processus pris séparément, indépendamment les uns des autres, tandis que le problème de la liaison des fonctions entre elles, le problème de leur organisation dans la structure d'ensemble de la conscience demeurait en dehors du champ d'attention du chercheur.*
>
> *(Vygotski, 1934/1997, p. 47)*

183. Il existe par exemple une démarche pour analyser les *positions sémiotiques* qu'adoptent les interlocuteurs (Leiman, 2012), mais pour ce qui est du sens (ou "meaning" en anglais) que les interlocuteurs donnent aux discours, les analyses des interactions font le plus souvent usage de démarches d'analyse empruntées à d'autres courants, comme l'analyse conversationnelle.

Si ces propos sont évidemment anciens, il est néanmoins reconnus aujourd'hui que leur pertinence est toujours d'actualité (voir p.ex. : Vergnaud, 1999). Dans son analyse du problème du rapport entre pensée et langage, Vygotski soulève la question de la coordination des résultats des recherches en psychologie, à laquelle je fais écho dans ma réflexion sur la nécessité d'une échelle en psychologie (voir chapitre 2). Vygotski pose explicitement la question de l'échelon pertinent pour la recherche sur le rapport entre langage et pensée, à l'aide de l'exemple de l'eau : un chimiste peut analyser l'eau la décomposant en oxygène et en hydrogène. Mais pour expliquer que l'eau éteint le feu, le recours à cet échelon ne l'avancera guère, puisque l'oxygène seule et l'hydrogène seule alimentent plutôt la combustion qu'elles ne l'étouffent. À partir de cet exemple illustratif, Vygostki se pose la question de la pertinence de l'échelon choisi à l'aide du concept d'*unité* : comme la molécule d'eau dispose des propriétés permettant d'éteindre le feu *à l'échelon de la molécule*, l'*unité* disposant des propriétés d'éteindre le feu se trouve à l'échelon de la molécule. Dans ce cas et pour cette question de recherche, c'est donc la molécule qui constitue une *unité*[184] pertinente, les propriétés recherchées demeurant introuvables si le chimiste analyse l'eau en plus petits éléments. Pour Vygotski, il s'agit de trouver quel est l'échelon qui fait *unité* pour chaque phénomène et pour chaque question de recherche (par exemple pour trouver les raisons qui permettent à l'eau d'éteindre le feu), au sens où une telle unité dispose de propriétés qui disparaissent si on l'a décompose davantage.

Suite à cette réflexion épistémologique, Vygotski se pose la question de l'unité pertinente pour la recherche permettant d'articuler pensée et langage :

> *L'élément décisif, le tournant pour toute étude à venir de la pensée et du langage nous semble être le recours à une autre type d'analyse. Celle-ci pourrait être définie comme une analyse qui décompose un tout complexe en unités de base (edinica). Par unités de base (edinica) nous entendons des produits de l'analyse tels qu'à la différence des éléments ils possèdent* toutes les propriétés fondamentales du tout *et sont des parties vivantes de cette unité qui ne sont plus décomposables. La clef de l'explication des propriétés singulières de l'eau est non pas sa formule chimique mais l'étude des molécules et du mouvement moléculaire. De même la véritable unité de base de l'analyse biologique est la cellule vivante, qui conserve toutes les propriétés fondamentales de la vie inhérentes à l'organisme vivant.*
>
> *La psychologie qui veut étudier les unités complexes doit le comprendre. Elle doit remplacer les méthodes de décomposition en éléments par la méthode d'analyse en unités de base (edinica). Elle doit trouver ces unités de base (edinica) indécomposables, qui conservent les propriétés spécifiques du tout en tant qu'unité et dans lesquelles inversement des propriétés se retrouvent, et à l'aide de cette analyse elle doit tenter de résoudre les questions concrètes qui se posent à elle.*
>
> *Quelle est donc cette unité de base qui n'est plus décomposable et qui comporte les propriétés inhérentes à la pensée verbale en tant que tout ? Nous pensons qu'elle peut se trouver dans l'aspect interne du mot - dans sa signification.*
>
> *(Vygotski, 1934/1997, pp. 53-54)*

184. Ce concept est proche de celui de *totalité* chez Piaget, me semble-t-il, quoique l'usage que Vygotski en fait dans sa réflexion méthodologique n'est pas explicite chez Piaget.

Pour Vygotski, l'unité pertinente est "l'aspect interne" ou "signification" d'un mot - traduit par "word meaning" en anglais (Vygotsky, 1934/1986) - c'est-à-dire à l'échelon d'un "mot". La traduction est difficile, et sans préjuger de la pertinence de ce choix pour représenter la pensée de Vygotski, je pense pouvoir faire correspondre cette *unité* du *mot-signification* à ce que Grize (1996) définit comme un *objet de discours* dans sa théorie, à savoir une *classe-objet*. Celle-ci se situe à l'échelon du mot ou terme linguistique, mais sans en respecter la délimitation linguistique : elle peut contenir un groupe nominal entier, une suite de synonymes, voire une proposition relative qui constitue toute entière un *objet de discours* singulier. Je reviendrai à la section 3.3.1 (p. 159 et suivantes) sur les particularités de l'approche de Grize, qui rend cet échelon du *mot-signification* particulièrement maniable.

Pour Vygotski, cette unité du *mot-signification* n'est pas non plus équivalente à la signification d'un terme linguistique telle qu'elle est donnée par la définition d'un dictionnaire (voir p.ex. le commentaire de Fleer, 2012), mais bien du *sens* particulier que prend un (groupe de) mot(s) lors d'un acte de communication singulier. Ce texte de Vygotski sur la méthode adéquate pour aborder le rapport entre pensée et langage est infiniment précieux pour cette recherche, en ce qu'il m'a permis de reconnaître la pertinence de la logique naturelle - qui décompose justement la construction du discours jusqu'à ce niveau-ci - pour fournir à mes analyses un métalangage permettant de décrire les points de vue des élèves et de l'enseignant à la fois comme discours et comme pensée.

Vygotski poursuit sur ce point :

> *Cependant la signification du mot est autant l'unité de base de ces deux fonctions du langage que* l'unité de base de la pensée. *Que la communication immédiate entre les individus soit impossible, c'est assurément un axiome pour la psychologie scientifique. On sait aussi que la communication non médiatisée par le langage ou tout autre système de signes ou moyens, comme on l'observe dans le monde animal, ne peut être que des plus primitives et des plus limitées. Au fond cette communication à l'aide de mouvements expressifs ne mérite pas le nom de communication mais doit bien plutôt être appelée* contagion. *Le jars qui, effrayé à la vue du danger, fait se lever tout le troupeau par ses cris ne lui communique pas tant ce qu'il a vu qu'il ne lui transmet par contagion sa propre frayeur.*
>
> *La communication, fondée sur la compréhension rationnelle et sur la transmission intentionnelle de la pensée et des expériences vécues, exige immanquablement un certain* système de moyens, *dont le prototype était, est et restera toujours le langage humain, né du besoin de communiquer dans le processus du travail. Mais jusqu'à ces tout derniers temps on avait une représentation extraordinairement simplifiée des choses, conforme au point de vue dominant en psychologie. On pensait que le signe - le mot, le son - est un moyen de communication. En fait, la seule cause de cette erreur était l'emploi injustifié de l'analyse qui décompose en élément pour résoudre le problème du langage.*
>
> *(Vygotski, 1934/1997, p. 57)*

Dans cet extrait, Vygotski termine par une critique du choix de l'échelon d'observation pour l'étude de la pensée. De son point de vue, l'unité qu'est le *mot-signification* n'est pas seulement un moyen de

communication, mais aussi un moyen de cognition, c'est-à-dire autant un instrument de pensée pour celui qui l'utilise que pour son éventuel interlocuteur.

C'est l'une des hypothèses parmi les plus populaires de Vygotski, acceptée par beaucoup de chercheurs, et extrêmement fertile [185] : celle du langage comme *instrument de pensée*. Le fait de communiquer n'est pas seulement *expression* de la pensée, mais également l'occasion de travailler, affiner, voire *construire* sa pensée. Si Vygotski défend la pertinence de l'unité du rapport entre pensée et langage au niveau du mot-signification, c'est que cet échelon permet justement d'observer l'articulation en pensée et langage dans le lieu même de leurs interactions réciproques, l'une s'exprimant par l'autre, et l'autre contribuant à construire la première.

Ainsi, l'étude micro-génétique des processus de communication devrait permettre de mieux comprendre comment se construisent les connaissances des apprenants au cours de leur pratique de communication, et en particulier d'aborder les savoirs fortement dépendants de la culture (ce qui est naturellement le cas de la physique newtonienne), pour lesquels la pensée ne peut se construire sans un langage spécifique, par opposition, par exemple, à des schèmes sensori-moteurs ou certains structures opératoires qui peuvent se développer en interaction avec le monde physique. Collet (2000) présente par exemple une étude détaillée inspirée de cette idée forte d'une unité mot-signification issue de l'approche historico-culturelle, et met en évidence l'importance du langage - et en particulier de certaines formules conventionnelles culturellement déterminées - dans l'apprentissage de la physique et dans l'activité de modélisation des élèves. Cette étude soulève la question des rapports complexes entre le langage de la physique, également une construction humaine effectuée collectivement au fil de l'histoire des idées scientifiques occidentales, et le langage et la pensée des élèves qui sont invités à s'approprier individuellement ces savoirs enseignés dans une forme culturelle bien particulière [186]. Les spécificités de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique nous orientent vers les recherches en didactiques des sciences.

3.2.11 Des approches en didactiques des sciences

Le champ de recherche en didactique, que ce soit des perspectives de didactique des sciences, d'autres didactiques disciplinaires, ou encore celle de la didactique comparée, contribue aussi à cette recherche sous

185. Les recherches sont bien trop nombreuses pour être citées ici (pour une bonne introduction en français à ce champ de recherche, voir p.ex. : Tourmen, 2011). Récemment, cette hypothèse motive une réinterprétation de la théorie de l'évolution qui met au centre du développement de l'espèce humaine les dimensions sociales et culturelles, qui agissent comme un environnement dans le processus de sélection, et qui constitue un environnement à l'évolution de l'espèce qui a la particularité d'être créé par l'espèce elle-même (Cousins, 2014 ; Kohler, 2014b), ce qui place l'être humain dans une posture singulière au sein de la nature, où elle peut contribuer - de manière plus ou moins délibéré, d'ailleurs - à déterminer les conditions de sa prochaine évolution. Darwin décrivait déjà, en allant dans le même sens, la situation particulière - voire paradoxale - introduite par la culture ou civilisation humaine dans le processus général de l'évolution des espèces. Michel Beretti met cela en scène dans une pièce de théâtre (*Darwin en finit avec les Cirripèdes*, 2009) où le personnage de Darwin s'exclame : "Je dis que la sélection naturelle s'est ainsi désélectionnée elle-même, car l'altruisme rend l'humanité mieux apte à la survie. L'altruisme est bon pour l'ensemble de l'espèce" (p. 48). Pour un exposé de cette partie peu connue de la pensée de Darwin, voir aussi l'ouvrage de Patrick Tort *L'effet Darwin, sélection naturelle et naissance de la civilisation* (éditions du Seuil, 2008).

186. Je reviendrai plus précisément sur la construction historique des savoirs de physique newtonienne dans la discussion à la fin de la recherche (voir section 8, p. 709 et suivantes).

bien des aspects. Il me paraît néanmoins difficile de rendre compte de manière spécifique des apports de cette littérature à ma perspective, pour au moins deux raisons :

1. Les travaux en didactique des sciences, et encore moins dans les diverses didactiques disciplinaires, ne constituent pas une seule approche, mais plutôt un foisonnement d'approches diverses et variées.

2. De par leur focalisation sur des éléments spécifiques, ces travaux m'ont été très utiles dans la mise en œuvre d'une démarche méthodologique, lors de la conception d'une séquence d'enseignement, à l'occasion des analyses des situations de malentendu - notamment pour comprendre le milieu scolaire et son fonctionnement - et lors de mes commentaires et discussion des résultats.

Pour ces raisons, je citerai mes références dans ce champ de littérature directement au moment opportun dans les prochains chapitres. En termes de regard porté sur l'apprentissage, je me limite ici à signaler parmi les travaux quelques exemples qui illustrent la diversité des apports de ce domaine à cette recherche.

Les recherches de Driver (1973) et Driver et al. (1985, 1996) [187] sur les représentations des élèves ont attiré mon attention sur l'importance des rapports entre épistémologie et apprentissage de la physique (et des autres sciences de la nature) : selon la manière qu'ont les élèves d'apprendre, et la manière dont les sciences sont enseignées, les connaissances des élèves risquent de se limiter à des connaissances prédicatives, sans aucune conscience de la *nature* des sciences et, en particulier, du rôle que jouent la formulation d'hypothèse, le débat et la pratique de l'observation et de l'expérimentation. Autrement dit, les sciences risquent pour une majorité d'élèves de ne constituer que des connaissances prédicatives, de telle sorte que ces élèves sont incapables de construire de nouvelles connaissances scientifiques par eux-même, en reprenant le *modus operandi* des sciences, et parfois même malgré de longues études académiques (Driver et al., 1996 ; Lopes, Costa, Weil-Barais, & Dumas Carré, 1999).

Les travaux de Halbwachs et Bovet (1980) ; Pauen (1996) ; Tiberghien (1989a, 1989b, 2003) ; Tiberghien et Weil-Barais (1987) ; Viennot (1978, 1989a, 1989d, 1993, 1996, 1998) mettent en évidence, dans le détail du quotidien des élèves, les implications pour leur apprentissage de la manière d'aborder les sciences. Ces travaux, avant même la mode des *conceptions individuelles* (Giordan & de Vecchi, 1990), "misconceptions" (McCloskey et al., 1983) et autres "mental models", décrivent des représentations et des raisonnements courants chez les élèves, et les écarts qu'ils entretiennent avec les attentes scolaires. En évitant le piège d'une attribution de connaissance individuelle sous la forme de conceptions [188], ces travaux fournissent de précieuses descriptions illustrant l'impact sur l'apprentissage des élèves de petits écarts dans le raisonnement ou la conceptualisation entre les attentes scolaires et le sens que les élèves donnent aux termes utilisés, aux tâches qu'ils doivent effectuer, ou lors de leurs raisonnements.

187. Je fais référence à la thèse de Rosalind Driver car elle y formule déjà cette idée, selon ses propres citations, mais je n'ai malheureusement jamais réussi à obtenir cette publication.
188. Pour cause, ces recherches restent justement vagues sur la question *psychologique* de savoir ce qui se joue dans ces phénomènes, cherchant plutôt à mettre en évidence les enjeux des détails de conception d'activité d'enseignement et de l'interprétation de ces activités par les élèves.

Le niveau de détail que fournissent ces travaux m'a convaincu de l'importance d'une investigation précise, et de la réflexion nécessaire sur les savoirs enseignés eux-mêmes pour pouvoir procéder à une mise en contraste entre les points de vue. La recherche de Halbwachs et Torunczyk (1985) est particulièrement éloquente sur l'importance du détail, et m'a fait prendre conscience qu'il fallait également questionner et éventuellement remettre en question les *savoirs enseignés*, et non seulement leurs interprétations par les élèves.

Moins spécifiques à la physique[189] mais également importants pour l'apprentissage des sciences, les travaux de Brousseau (1998/2004) sur le *contrat didactique*[190], forme spécifique du contrat de communication, m'ont également conduit à interpeller la communication en tant qu'activité sociale contractuelle où apparaissent immanquablement d'occasionnelles négociations, et sur le problème des points de vue relativement au devenir de la situation didactique en *situation adidactique* du *point de vue* des élèves : cet objectif ne saurait être perdu de vue[191] pour une recherche opérant dans le milieu scolaire sans une perte de sens de la construction sociale d'un milieu qui vise la transmission de compétences utiles, justement, *hors* du milieu scolaire, hors de l'école.

Enfin, de nombreuses recherches s'intéressant aux liens entre les activités effectuées en classe de science et l'apprentissage des élèves sont à l'origine de ma participation à la conception d'une séquence d'enseignement visant à donner aux élèves les meilleures conditions pour apprendre la physique newtonienne, notamment[192] :

— des publications sur l'usage du conflit socio-cognitif en milieu scolaire (voir p.ex. : Baker, 1992, 2008 ; Buchs & Butera, 2004 ; Gilly et al., 1999 ; Howe, Tolmie, & Rodgers, 1992 ; Perret-Clermont & Schubauer-Leoni, 1981 ; Schubauer-Leoni, 1989 ; Zittoun et al., 1997), soulevant les difficultés consistant à faire de ce concept descriptif de psychologie une "pédagogie", et ouvrant à la vaste question de l'efficience du travail coopératif en milieu scolaire (pour une bonne synthèse de ce débat en français, voir : Rouiller & Lehraus, 2008), qui dépend aussi selon certains auteurs (voir p.ex. : Toomela, 2007) du type de connaissance/savoir ;

— des publications sur les concepts d'*apprentissage par la découverte* (Charpak, 1998 ; Shulman & Keislar, 1973) de *situations-problèmes* (voir p.ex. : Boilevin, 2005 ; De Vecchi & Carmona-Magnaldi, 2002) et de *problématisation* (voir p.ex. : Fabre, 2011 ; Morin, 1982/1990 ; Orange, 2005a, 2005b ; Rogers, 1969/1984), issues d'une volonté de mettre les élèves en réflexion et d'éviter l'apprentissage

189. Quand bien même Brousseau élabore sa théorie en didactique des mathématiques, je ne vois pas pourquoi sa validité se limiterait à l'enseignement des mathématiques.

190. Je n'ai, par contre, pas trouvé l'utilité de la modélisation de la situation par la théorie des jeux pour cette recherche, une démarche qui m'a semblé à la fois trop complexe et peu pertinente pour mettre en évidence des divergences selon les points de vue, son caractère formel empêchant justement de traiter des contenus - le *sens* que prennent les activités pour les élèves.

191. C'est néanmoins un des composants les moins cités de la théorie de Brousseau.

192. Je suis malheureusement incapable de citer tout ce que j'ai lu à ce sujet, ce ne sont donc que quelques exemples parmi d'autres (pour une bonne introduction, voir p.ex. : Joshua & Dupin, 1993), et une infime portion des recherches existantes (pour une revue des travaux européens, voir p.ex. : Welford et al., 1996). Bliss et Weil-Barais (1990) offrent également un bref aperçu des recherches dans ce domaine, qui permet d'en retracer l'histoire.

se réduisant à l'acquisition de connaissances prédicatives et d'encourager le questionnement propre aux élèves ;

— des recherches sur le rôle de l'observation et de l'expérimentation scientifique dans l'apprentissage des élèves (p.ex. : Astolfi, 2002 ; Astolfi et al., 1984 ; Johsua & Johsua, 1988 ; Reiner & Gilbert, 2004 ; Schauble, Glaser, Duschl, Schultz, & John, 1995 ; Schauble et al., 1991 ; Tiberghien, 1989b ; Viennot, 1998), et les problèmes que soulèvent cette activité en milieu scolaire dans une finalité d'apprentissage ;

— des recherches sur l'usage des technologies informatiques pour l'enseignement des sciences (voir p.ex. : Baker, 2003 ; Baker, Andriessen, Lund, van Amelsvoort, & Quignard, 2007 ; Baker, De Vries, Lund, & Quignard, 2003 ; Baker & Séjourné, 2007 ; Bental, Tiberghien, Baker, & Megalagaki, 1995 ; Bernard, Weil-Barais, & Caillot, 2006 ; Coppens, 2007 ; De Jong & Van Joolingen, 1998 ; de Vries, Lund, & Baker, 2002 ; Lund, Molinari, Séjourné, & Baker, 2007 ; Marro, 2004 ; Richoux & Salvetat, 2002 ; Séjourné, Baker, Lund, & Molinari, 2004 ; Tiberghien & de Vries, 1997 ; Vince & Tiberghien, 2000) ;

— les travaux sur la modélisation (Brna et al., 2002 ; Martinand, Astolfi, Drouin, Genzling, & Rumelhard, 1992 ; Tiberghien, 1994 ; Tiberghien & Vince, 2002 ; Tiberghien & Weil-Barais, 1987 ; Weil-Barais & Lemeignan, 1990 ; White & Frederiksen, 1998 ; Winther, 2006), qui m'ont aidé [193] à comprendre les enjeux de l'apprentissage de la physique sur le plan épistémologique et, notamment, à comprendre les savoirs scientifiques visés par l'enseignement de la physique en général au sujet desquels plusieurs travaux (voir en particulier : Collet, 2000)mettent en évidence l'importance du langage et les risques de malentendu.

Les rapports complexes entre épistémologie, interactions sociales en classes et communication, expérimentation et modélisation (voir p.ex. : Vergnaud et al., 1978) sont l'objet d'une nouvelle approche de ces vingt dernières années, où les chercheurs s'intéressent à l'argumentation dans les activités d'apprentissage des sciences. Cette approche initie une pluridisciplinarité du regard sur l'apprentissage en science, et constitue également une source importante pour cette recherche.

3.2.12 Une approche centrée sur l'argumentation

L'approche de l'apprentissage centrée sur l'argumentation [194] contribue à la perspective permettant d'aborder l'apprentissage à travers des *situations de malentendu*, d'une part en ouvrant un interface d'échange entre des perspectives - voire des disciplines - différentes, et d'autre part en se focalisant

193. Avec la précieuse et patiente sollicitude de Bernard Chabloz...

194. Cette manière de nommer ces travaux ne reflète pas suffisamment la diversité des perspectives et des croisements de regards qu'a permis ce champ de recherche, constitué à l'interface de plusieurs disciplines, mais elle permet au moins de reconnaître l'émergence d'un nouveau centre d'intérêt, d'une focalisation sur l'argumentation en lien avec le milieu éducatif, qui a permis non seulement des travaux d'un genre nouveau, mais surtout des rencontres entre plusieurs traditions de recherche. Je profite de cette note pour signaler que cette approche - aussi diverse soit-elle - a également constitué le *milieu social* dans lequel j'ai évolué lors de l'élaboration de cette recherche, à travers les interactions sociales réelles et stimulantes dont j'ai bénéficié au début de mon travail en participant à un projet européen (voir la présentation de la méthodologie, chapitre 4, p. 235 et suivantes).

sur une pratique - l'argumentation - elle-même à l'interface du langagier et du cognitif. En effet, cette nouvelle approche de l'apprentissage des sciences de la nature, centrée sur l'argumentation, participe à la mise en relation de plusieurs approches et même de plusieurs disciplines [195], reliant l'argumentation tantôt aux questions épistémologiques relatives à la nature des savoirs scientifiques (p.ex. : Grize, 1982 ; Meyer, 1986b) et à ses fondements rhétoriques (Perelman & Olbrechts-Tyteca, 1958/2000) plutôt que dans des explications causales (voir à ce sujet les travaux mettant en évidence les limites des explications causales dans la représentation, la conceptualisation et la modélisation en sciences en milieu scolaire, p.ex. : Besson, 2005 ; Dontaine, 2015 ; Rumelhard, 2000 ; Tiberghien, 2004), tantôt à la question spécifique de l'enseignement et de l'apprentissage de ces sciences (Asterhan & Schwarz, 2009 ; Baker, 2002 ; Buty & Plantin, 2008 ; Douaire, 2004 ; Driver, Newton, & Osborne, 2000 ; Erduran & Jiménez-Aleixandre, 2008 ; Leitão, 2000 ; Muller Mirza & Buty, 2015 ; Muller Mirza & Perret-Clermont, 2009 ; Osborne et al., 2004b ; Osborne, Erduran, Simon, & Monk, 2001 ; Quignard, 2000 ; Schwarz, Dreyfus, & Hershkowitz, 2009 ; Schwarz, Neuman, Gil, & Ilya, 2003), ou encore à l'introduction en milieu scolaire de savoirs controversés dans des activités de débat (voir p.ex. : Albe, 2005 ; Zeidler, Osborne, Erduran, Simon, & Monk, 2003).

Le croisement entre les préoccupations spécifiques à l'enseignement des sciences et à l'apprentissage - argumenter pour apprendre (Muller Mirza & Perret-Clermont, 2009) - permettent d'ouvrir un vaste chantier prometteur à la fois sur le plan théorique, dans le but de comprendre les processus d'apprentissage (avec par exemple la proposition d'une théorie de l'*argumentissage* : Schwarz & Baker, 2015), et sur le plan praxéologique, dans le but d'enseigner les sciences d'une manière qui conduit les élèves à une appropriation plus proche de la perspective scientifique et des savoirs qu'elle permet de construire (p.ex. de nouvelles pratiques d'enseignement inspirées du dialogue, "dialogic teaching" ou "dialogic learning" : Baker, 1993 ; Ford, 2012 ; Hakkarainen & Paavola, 2007 ; Ligorio & César, 2013 ; Mercer, Dawes, Wegerif, & Sams, 2004 ; van den Broek, Leerentveld, & van Schelven, 2013 ; Wegerif, 2006, 2011b).

Dans l'ensemble de ces travaux, la référence aux recherche sur le rôle des interactions sociales dans l'apprentissage et à la mise en évidence du *conflit socio-cognitif* (Perret-Clermont, 1979), est omniprésente et constitue l'une des idées fondamentales justifiant cet intérêt aux rapports entre argumentation, processus d'apprentissage, activités de débat ou de controverse, et savoirs scientifiques. Ce courant ouvre de nombreuses nouvelles possibilités en croisant le champs de recherche spécifiquement dédié à l'étude de l'argumentation (pour une revue de la littérature dans ce domaine, voir p.ex. : Eemeren, 2003 ; Eemeren et al., 2014 ; Plantin, 2005), aux travaux sur les interactions sociales dans les activités d'apprentissage.

D'une part, un des effets de ces croisements conduit la réflexion sur l'argumentation à prendre davantage en considération le contexte des activités argumentatives (voir p.ex. : Perret-Clermont, 2006 ; Rigotti, 2006), à réfléchir à la définition de l'argumentation dans les activités d'apprentissage (voir p.ex. : Nonnon, 1996 ; Schwarz & Baker, 2017) où elle ne peut se limiter à des activités visant la *persuasion* de l'interlocuteur (pour une distinction entre argumenter, persuader et convaincre, voir p.ex. : Grize, 1995) ou la prise

195. Ce n'est pas un hasard si plusieurs auteurs que je citerai ici pour cette approche sont aussi présents dans celle centrée sur l'enseignement des sciences, celle centrée sur le dialogue ou encore sur l'apprentissage dans et par les interactions sociales : l'intérêt à l'argumentation dans l'apprentissage des sciences a notamment pour origine la fructueuse rencontre entre ces courants (voir p.ex. : Baker, 2004).

de décision. La complexité des questions soulevées par ces travaux motive, plus récemment encore, des recherches se focalisant sur l'argumentation chez les enfants (Greco Morasso et al., 2015 ; Perret-Clermont et al., 2015, 2019 ; Sinclaire-Harding et al., 2013).

D'autre part, ces croisements amènent aux sciences de l'éducation un potentiel encore largement à exploiter, en vue d'une meilleure compréhension des processus d'apprentissage, et d'une facilitation des acquisitions des élèves. En particulier, Vergnaud (2015) souligne les effets positifs des pratiques argumentatives pour la conceptualisation, c'est-à-dire spécifiquement le type de connaissances qui pose problème dans l'apprentissage des sciences (voir le "faux débat" discuté à la section 2.1.4, p. 32 et suivantes), que j'ai décidé d'aborder à travers les situations de malentendu. Je tenterai donc de donner une grande place à ces activités argumentatives dans la séquence d'enseignement de physique newtonienne observée (voir chapitre 4), d'une part pour se donner les moyens d'observer les processus qui m'intéressent, et d'autres part pour offrir aux élèves les meilleures conditions d'apprentissage, de telle sorte que les situations de malentendu observées ne proviennent pas d'un manque de soin dans la conception du dispositif d'enseignement ou dans les choix pédagogiques, mais bien puisse être attribuée aux processus d'apprentissage eux-mêmes.

3.3 Une approche pour coordonner les autres

3.3.1 Introduction à l'oeuvre de Grize

Le choix de l'œuvre de Jean-Blaise Grize comme principale ressource théorique pour l'analyse des situations de malentendu s'explique pour au moins deux raisons :

1. L'orientation de cette théorie vers la description de la pensée naturelle[196] la plus proche de sa logique propre en fait une prolongation de la démarche de psychologie génétique constitutive de cette recherche.

2. L'oeuvre de Grize est conçue pour intégrer plusieurs disciplines, avec pour chacune d'elle un rôle spécifique (pour plus de détails, voir : Grize, 1994) permettant une coordination des perspectives sur la pensée naturelle, notamment l'épistémologie génétique, la logique, la sémiologie, les sciences du langage et de la communication, la psychologie et la sociologie.

L'œuvre de Grize, par sa perspective *transdisciplinaire* (Piaget, 1972b) sur la question de la pensée naturelle, joue ainsi un rôle particulier dans cette recherche : elle fournit ainsi les outils, *au niveau requis de détail*, pour relier et articuler :

— les travaux piagétiens et néo-piagétiens - notamment les concepts d'*opération*, de *coordination*, de *point de vue*, d'*assimilation* et d'*accommodation* à l'analyse des opérations effectuées par des sujets sur des discours ;

— l'épistémologie génétique, la logique et les théories de l'argumentation permettant d'aborder la question de la nature des connaissances humaines, ce qui est utile dans cette recherche à la fois pour notre épistémologie de référence et pour caractériser les savoirs scolaires ;

— les constituants sociaux, culturels et historiques des discours et de la pensée - notamment par le lien entre dialogisme, représentations sociales, et préconstruits culturels chez Grize (1996), et par l'orientation sur la construction *en situation* de la pensée, qui est toujours considérée comme celle de sujets singuliers et situés ;

— la démarche génétique d'étude de *processus* de construction dans l'interaction entre des personnes et avec le milieu (matériel, social, institutionnel, culturel, historique, etc.) dans lequel ils agissent, qui fait de la psychologie une psychologie de l'action (et non du comportement) et des opérations, et de la logique une logique de l'action et des opérations.

196. Le terme "naturel" dans "logique naturelle" est utilisé par Grize dans le sens d'une pratique quotidienne, qui s'oppose à certaines pratiques rares développées dans des buts hors du commun. Dans cet usage, "naturel" s'oppose à "savant" ou "spécialisé" plutôt qu'à "artificiel". Or, le phénomène des conceptions des apprenants est justement un problème de pensée naturelle confrontée à la pensée scientifique, formelle ou formalisante. L'approche de Grize fournit donc potentiellement une clef de lecture de l'énigme des conceptions des apprenants.

Grize fournit un outillage théorique riche et spécialement conçu pour l'étude des mouvements de la pensée à travers les phénomènes logico-discursifs tels qu'ils apparaissent dans leur usage quotidien, ou usage "naturel".

Sa démarche repose sur un principe, le *principe de générosité*, qui postule que celle ou "celui à qui l'on s'adresse met tout en œuvre pour donner sens à ce qui lui est dit" (Grize & Piérault-Le Bonniec, 1983, p. 164). Ce principe permet d'aborder le problème à l'origine de mon intérêt pour les situations de malentendu : quand une personne ne comprend pas ce qui lui est communiqué par une autre, elle comprend néanmoins souvent *quelque chose*, à l'exception des occasions où elle est consciente de ne pas comprendre. Ce "*quelque chose*" apparaît comme une énigme à la psychologie cognitive qui cherche à expliquer le comportement des individus à partir de biais de raisonnement ou d'autres facteurs. Dans une psychologie de l'action, et avec le principe de générosité énoncé par Grize, il devient possible de théoriser ce "*quelque chose*" comme le résultat d'un processus créatif des personnes (ou agents) : il nous arrive incessamment de créer des *quelque chose*, afin de donner sens à ce qui nous est dit.

Sans anticiper sur la suite, nous pouvons déjà remarquer que le problème des malentendus comporte deux faces : une face "négative", où il apparaît comme la distorsion du sens par rapport aux intentions de son auteur, et une face "positive", où le malentendu apparaît comme la création d'un sens nouveau, c'est-à-dire comme le résultat d'un processus d'apprentissage et/ou d'imagination, ou au moins d'assimilation par la personne à ce qu'elle connaît déjà. Le processus de création de sens, de *sémiose*, est considéré par Grize comme une *schématisation*, c'est-à-dire une *représentation discursive* qui est à la fois *produit* et *processus*. Grize intègre les deux aspects du problème général des malentendus dans le processus de *schématisation* :

> *De ce que les schématisations se servent de notions, et pas de concepts vrais, découlent deux conséquences d'ailleurs liées. L'une est l'existence d'un certain flou qui fait que chaque destinataire doit toujours interpréter ce qui lui est proposé. On peut alors estimer que ce vague constitue un défaut, une faiblesse, mais c'est refuser en même temps de voir son inestimable avantage, qui est précisément d'ouvrir la signification à des sens multiples, condition* sine qua non *du progrès de la pensée.*
>
> *(Grize, 1996, p. 51)*

A la lecture de ce passage, il est déjà possible d'envisager le rôle central que peut jouer ce double aspect dans l'apprentissage : les situations de malentendu, considérées sous l'aspect "négatif", entraînent des interprétations incomplètes et divergentes, alors que considérées sous l'aspect "positif", elles permettent de faire progresser la pensée, autrement dit d'apprendre, mais aussi parfois d'inventer et faire des découvertes.

Le processus de "création de sens" (meaning making) est lui-même double, comme l'explique Grize quand il traite de la question du sens :

> *Ceci conduit à admettre que pour qu'il y ait sens, il est nécessaire de postuler une double activité, celle du locuteur d'une part et celle du locuté, conformément au schéma général dans cet ouvrage. Le locuteur propose des signes dans l'intention de faire sens et le locuté leur* donne *sens.*
>
> Pour qu'il y ait sens, écrit Raymond Tschumi, il faut deux actes créateurs, l'un au départ, l'autre à l'arrivée du message. *[TSCHUMI 1987 : 176].*
>
> *Cette double activité pose sans doute la question de l'isomorphisme entre la construction et la reconstruction du sens, mais elle semble inéluctable. Il y a là un pari toujours renouvelé.*
>
> *(Grize, 1990, p. 92)*

Nous présenterons en détail le schéma auquel Grize fait référence ici dans une section suivante. Pour notre propos actuel, nous aimerions juste faire remarquer que la double activité mise en évidence par Grize dans ce passage ancre le sens dans une réalité résolument sociale : on ne crée jamais du sens seul, l'autre est toujours présent - même si c'est de manière différée, intériorisée, ou médiatisée - car le sens que communique une schématisation dépend à la fois de sa construction par le locuteur et de sa reconstruction par le locuté.

Ce modèle de la communication met en évidence le risque permanent de situations malentendu, et permet d'aborder l'apprentissage en considérant le deux aspects "négatifs" et "positifs" du processus, à la fois divergent des intentions et créatif, qui en fait résolument une question de psychologie sociale puisque ce phénomène se joue *entre les personnes*, dans leur *syntonisation* - pour reprendre la métaphore des ondes que suggère Grize (1996) dans son texte - et ses échecs partiels et/ou temporaires.

L'œuvre de Grize pose les bases pour opérer un tournant dans l'analyse socio-cognitive : tout en reprenant une bonne partie de l'héritage piagétien, en donnant à la communication, aux dimensions sociales et culturelles et au dialogisme une place constitutive de la pensée, elle complète l'édifice par une théorie qui permet d'investiguer les liens particuliers et situés entre des processus cognitifs et des processus communicatifs. Surtout, la logique naturelle permet de résoudre le problème de l'attribution des conceptions en évitant les deux écueils extrêmes : d'une part l'utilisation par le chercheur de modèles ou concepts savants pour catégoriser ses données, et d'autre part l'abandon pur et simple des représentations voire du cognitif dans son ensemble [197]. Cette "solution" vient de ce que la logique naturelle permet la description des conceptions des élèves *telles qu'elles sont communiquées*, sous la forme de *représentations discursives*, c'est-à-dire ce que Jean-Blaise Grize nomme *schématisation* [198].

Cette perspective ne pose pas le problème des "inclassables", puisqu'il ne s'agit plus d'opérer des attributions de conceptions individuelles en partant de réponses verbales ou de comportements apparaissant comme individuels, mais en réalité (presque) toujours produits *en réponse à* une demande sociale, que ce soit une question verbale ou des attentes communiquées autrement, voire à l'extrême mettant en

197. La plupart des approches situées ou discursives n'utilisent plus du tout les concepts de psychologie cognitive, et ne peuvent ainsi être reliées à ces savoirs.

198. Le concept de *schématisation* est proche de l'idée de *Vorstellung* de Kant en ce qu'elle fait référence à cette idée de *montrer*, *placer devant soi*, bien que ce *montrer* et ce *placer devant soi* est chez Grize conversationnel - et par conséquent social - plutôt que cognitif et individuel. Peut-être est-ce là un pas suffisant pour faire de la représentation quelque chose de "public" et "matériel" comme Sensevy, Tiberghien, Santini, Laubé, et Griggs (2008) le revendiquent.

acte de pures imitations d'autrui. La démarche de recherche consiste à construire une interprétation des conceptions telles qu'elles sont présentes dans la communication, à l'aide d'hypothèses précises et détaillées. Les conceptions ne sont pas attribuées à des élèves de manière idiosyncratique avant d'être décrites comme les représentations discursives communiquées dans une situation et à un moment donné, et interprétées des manières variées par les interlocuteurs. Si les processus de communication ne permettent pas de rendre compte du processus de construction de sens en situation, il est néanmoins possible, dans le modèle de Grize, d'invoquer les *représentations* individuelles des interlocuteurs. Celles-ci étant néanmoins inobservables, c'est une sorte de "dernier recours" pour l'analyste, qui ne se justifie qu'en rapport aux éléments permettant de comprendre la situation dans son ensemble. La recherche peut ainsi porter son regard à l'échelon des situations, à l'échelon des significations, et articuler ces deux échelons entre eux ou avec d'autres si nécessaire, comme l'échelon individuel, dans une approche multiscalaire.

De plus, ces représentations discursives permettent de décrire la pensée en construction, sans devoir présumer que les apprenants ont la même "conception" à divers moments de leur apprentissage [199]. Si ce principe de cohérence permet de combler l'inachevé et l'implicite de la langue ou de la communication du point de vue du chercheur, c'est néanmoins au prix de faire des "conceptions" ainsi reconstruites des pensées abouties plutôt que des pensées qui se cherchent. Sensible à la difficulté de l'analyse de cette pensée en construction, Tiberghien (2003) discute le problème de la comparaison à une connaissance normative, et propose une procédure alternative qui repose sur l'examen minutieux par la chercheure de la cohérence du point de vue de l'élève. Prendre appui sur le concept de *schématisation* permet peut-être justement de reprendre cette méthode pour articuler les connaissances des élèves, qui apparaissent fragmentées [200], au processus même de communication prenant place au moment et dans le contexte de l'activité des élèves. La question de la cohérence repose alors aussi sur l'analyse de ce que l'enseignant - ou les pairs - énoncent, écrivent, etc. : en un mot, sur l'ensemble de la situation dans laquelle les élèves construisent leur pensée. La focalisation sur la schématisation permet d'aborder les connaissances des élèves à l'échelon des significations (au niveau correspondant aux *facettes* chez Tiberghien) tout en examinant leur cohérence au sein d'une *situation d'interlocution* spécifique [201].

Avec la démarche de la logique naturelle, le chercheur vise une reconstruction de la pensée naturelle de l'apprenant (comme en psychologie cognitive), à partir de la cohérence de son point de vue (comme Tiberghien l'explique dans la citation ci-dessus), en se focalisant sur le niveau que Vygotski indiquait : le *mot-signification*. Cela lui permet de prendre en considération le fait que le même terme n'a pas forcément le même sens selon le locuteur, ni non plus pour un même locuteur selon la *situation d'interlocution*. Grize (1996) utilise le concept de *classe-objet*, une classe méréologique selon Leśniewski, pour représenter ce *mot-signification*, ce qui permet de différencier les *termes linguistiques* des *objets du discours*, et de

199. Que l'intervalle entre les moments soit de quelques secondes seulement ou de plusieurs jours, nous pensons qu'il est essentiel de laisser ouvert la question de la similitude entre les représentations d'un même individu à des instants différents.
200. Le caractère infiniment ouvert de la schématisation nous invitera à plutôt considérer ces savoirs comme *partiels* que comme "fragmentés".
201. nous tenterons de montrer, dans la ligne d'autres auteurs et en particulier de Vergnaud, que le système cognitif en question ici est inextricablement lié à des situations, d'où le choix de cet échelon pour rendre compte des interprétations des apprenants, et qui pourraient expliquer l'apparente "résistance au changement" des "conceptions" des élèves que relève les autres approches.

composer des objets de discours complexes regroupant des termes selon leur utilisation dans la situation communicative, quels que soient leurs relations logiques dans les significations conventionnelles [202]. Cette définition des *classes* permet à l'analyste par exemple de considérer des termes comme synonymes si les données et la situation le guide vers cette hypothèse, qui ne le seraient pas forcément selon la définition du dictionnaire.

Douaire (2004) souligne cette spécificité de la logique naturelle de permettre une mise en évidence de la genèse et de la circulation de la signification en situation :

> *Les catégories logico-discursives proposées par l'École de Neuchâtel pour qualifier les opérations de la logique naturelle (Grize, 1996) donnent un cadre d'analyse pertinent pour comprendre ce qui se joue dans les échanges entre élèves du point de vue de la construction des objets et, de ce fait, facilitent la mise en cohérence de faits linguistiques apparemment épars. L'emploi de ces catégories met ainsi en relief les négociations de l'"objet du signe" pour lesquelles "l'activité globale discursive entre les interlocuteurs est nécessaire afin de s'assurer d'un accord suffisant" (Grize, 1996, p.86), tant que les échanges ne concernent pas un concept (terme que Grize prend dans un sens très restrictif). Cet outil d'analyse informe sur les processus heuristiques (ou "productifs") qui se jouent dans les échanges oraux argumentatifs. Il ne dit rien sur la pertinence des argumentations, ni sur leur validité.*
>
> *(Douaire, 2004, pp. 236-237)*

Avec la logique naturelle, le sens du point de vue d'un interlocuteur peut ainsi être reconstruit selon la cohérence de son utilisation personnelle de la langue, sans que la signification conventionnelle des termes ne l'emporte et empêche l'analyse de relever les sens différents utilisés par chacun. Cela permet également, dans une certaine mesure, de relever des changements de sens des mots utilisés par un apprenant au cours de sa conversation, en fonction de l'usage logico-discursif qu'il en fait. Je pense qu'il s'agit là d'une alternative aux analyses sous la forme d'un classement effectué par les chercheurs par rapport à des conceptions ou définitions prédéfinies, à un principe de cohérence basé sur l'usage des termes ou les comportements au cours de l'apprentissage.

Par ailleurs, la logique naturelle est également pertinente pour articuler les dimensions pragmatiques - communiquer c'est *agir* - et locutoires - les contenus énoncés sont représentés dans l'analyse avec les termes utilisés par les interlocuteurs. Cette articulation permet d'aborder la communication comme un phénomène multi-dimensionnel, avec des "couches" qui se superposent, comme l'explique Douaire dans cet extrait en parlant de la méthode de Bronckart [203] :

202. Par exemple, une classe peut comprendre le tout et l'une de ses parties.

203. Au cours de mes lectures, j'ai fait une observation surprenante : Bronckart (1985) développe un "modèle psychologique" où il utilise nombre de concepts et d'idées présentes dans l'oeuvre de Grize, par exemple les opérations d'ancrage et de détermination (*idem,* p. 43), alors que Grize les publie dans un texte de 1979 (si ce n'est avant), texte intitulé "Linguaggi e formalizzazioni"et repris quelques années plus tard en français dans un recueil (Grize, 1982, voir p. 223 et suivantes pour les opérations mentionnées) qui précède de trois ans le livre de Bronckart. En outre, ce dernier ne cite dans son ouvrage, de tous les travaux de Grize, que le texte de 1984 (*Sémiologie du raisonnement*) alors que tous les deux ont travaillé avec Jean Piaget et ne pouvaient manquer de connaître leurs travaux réciproques. D'autres idées semblent apparaître chez Bronckart et chez Grize sans citation ni de l'un, ni de l'autre, comme la référence à la "grammaire de Port-Royal" : d'abord chez Bronckart, Kilcher, &

> *Par ailleurs, nous inscrivons ces opérations d'objet dans le modèle développé par Bronckart (1996) qui décrit l'architecture des textes comme "un feuilleté*[3] *constitué de trois couches superposées : l'infrastructure générale du texte, les mécanismes de textualisation, et les mécanismes de prise en charge énonciative" (p.120). Parce qu'il vise à mettre à jour les liens étroits tissées entre les caractéristiques linguistiques des productions langagières et le travail de traitement de la situation opéré par les locuteurs ou les scripteurs, ce modèle paraît devoir faciliter l'interprétation des stratégies langagières mises en œuvre par les élèves pour "agir-parler" dans les situations proposées. L'outil utilisé est donc un outil "bricolé" qui prend en compte divers critères. Ces derniers permettent de repérer et de combiner différentes phénomènes.*
>
> *(Douaire, 2004, p. 237)*

Le modèle multi-dimensionnel en "couches superposées" - attribué ici à Bronckart mais qui correspond aussi à l'approche de Grize des *opérations logico-discursives* - permet d'étudier l'articulation entre les processus d'apprentissage cognitifs - les opérations cognitives sont de l'ordre de l'action - et les significations, c'est-à-dire les contenus qui sont autrement évacués dans les modèles de logique formelle.

Baker souligne également les multiples couches que permet le croisement de l'analyse des processus interactifs d'apprentissage avec une théorie de l'argumentation, et distingue plus précisément cinq couches imbriquées :

> *Mon choix théorique fondamental relatif à l'étude des interactions argumentatives a été de partir d'une logique, et une logique dialogique (Barth & Krabbe, 1992), étudiée sous un angle pragmatique (il s'agit de la pragma-dialectique de VAN EEMEREN et GROOTENDORST). Ce choix s'explique d'une part par une volonté de ma part d'inscrire mes travaux dans une démarche de modélisation cognitive. Dans le champ des recherches sur les interactions en psychologie, la fécondité de "la logique interlocutoire" d'A. TROGNON et ses collègues (par ex. Trognon, 1999, dans Gilly, Roux & Trognon, Éds., 1999) a été démontrée depuis de nombreuses années. D'autre part, puisque les travaux de Wason et Johnson-Laird (1972) sur le raisonnement chez l'individu prenaient comme référence les logiques "classiques" (la logique des propositions, des prédicats de premier ordre), il me semblait qu'il allait de soi que l'étude du raisonnement collectif dans le dialogue nécessitait une logique par essence dialogique. Enfin, il est important d'insister sur le fait que dans le cadre de cette recherche, la logique dialogique, si elle permet d'analyse d'une dimension — "dialectique" — de l'interaction, est seule insuffisante pour rendre compte des processus de co-élaboration des connaissances dans les interactions langagières. Pour cela, d'autres dimensions (ou "couches") d'analyse doivent être proposées : ce sera dans la "superposition" de plusieurs dimensions d'analyse*

Papandropoulou, 1976, p. 305 et ensuite chez Grize (1979, 1982), dans le texte déjà cité ci-dessus. Grize a néanmoins abordé le rapport entre logique, pensée et langage (voir la bibliographie de l'auteur, idem) au moins une décennie avant Bronckart, et publie son projet d'une "logique du quotidien" en 1956 déjà (Grize, 1982, p. 91) et sa proposition d'une psycho-logique en 1967 (*idem,* p. 115), où se trouvent des idées très proches de "l'approche psychologique" de Bronckart (1985). En outre, Bronckart ne cite pratiquement jamais Grize dans ses premiers travaux, malgré qu'ils portent parfois spécifiquement sur la sémiologie, travaux qui n'abordent cependant pas avant 1985 les concepts d'*opération d'ancrage* et d'*opération de détermination*, pris pour exemple ci-dessus. Si l'on suit une interprétation bakhtinienne du développement de la pensée scientifique, à contre-pied de l'essai controversé *Bakhtine démasqué* (Bronckart & Bota, 2011), ces faits troublants ne sont rien d'autres que les indices des multiples *voix* constituant une pensée, *a fortiori* une pensée scientifique : un auteur ne saurait prendre conscience de *toutes* ses sources.

que les processus interactifs d'apprentissage associés aux interactions argumentatives pourront être étudiés. Ces dimensions d'analyse additionnelles sont au nombre de cinq[29] *:*

1. *La dimension dialectique — elle comprend le jeu des interventions argumentatives (attaques, défenses), relatives aux thèses discutées.*
2. *La dimension rhétorique — elle porte sur les changements d'attitudes vis-à-vis des propositions discutées.*
3. *La dimension épistémologique — elle aborde la nature des connaissances en jeu dans le dialogue ; selon son origine, sur les plans perceptuel, cognitif et socio-institutionnel, une connaissance est plus ou moins ancrée, recevable et légitimée.*
4. *La dimension conceptuelle — elle comporte la façon dont l'univers de référence est (re)conceptualisé, l'évolution des notions en jeu dans le dialogue.*
5. *La dimension interactive — elle aborde les transformations cognitives-langagières (reformulations) et les transformations des connaissances en jeu.*

[29] *Il manque une dimension à cette liste — peut-être la plus importante ? — que mes recherches ont peu abordé d'une manière systématique jusqu'ici. Il s'agit de la relation interpersonnelle, ou la dimension interactionnelle (par ex. Muntig & Turnbull, 1998).*

(Baker, 2004, pp. 101-103)

La mise en lien de ces diverses couches est cependant loin d'être aisée au moment de procéder aux analyses. C'est dans le but d'une coordination concrète, au moment de la pratique de l'analyse de ces couches et de leurs rapports les unes avec les autres, que la logique naturelle m'a été particulièrement utile. Jean-Blaise Grize définit ainsi la logique naturelle :

J'appellerai logique naturelle *l'étude des opérations de pensée qui sont en œuvre dans l'élaboration d'une schématisation.*

(Grize, 1982, p. 191)

Dans les travaux de Grize, la *logique* proprement dite s'accompagne d'une construction théorique plus large [204], comprenant notamment une théorie de la communication et une *théorie de la connaissance* conçue pour permettre un travail sur les processus de théorisation, par exemple, et qui s'ancre sur une définition piagétienne de *la pensée*. Par "*théorie de la connaissance*", j'entends ici que cet ensemble théorique fournit non seulement les outils permettant d'étudier la pensée, mais qu'il permet également de spécifier le statut de ces outils eux-mêmes : Grize fournit par exemple des définitions explicites de *théorie*, de *notion* et *concept*, d'*axiomatisation* ou d'*abduction*, etc. La construction théorique de Grize, si l'on y inclut les travaux piagétiens en épistémologie génétique et néo-piagétiens en psychologie socio-cognitive, a cela d'exceptionnel qu'elle permet à la fois de rendre compte des objets d'étude à l'aide des outils intellectuels

204. Pour cette raison, j'utilise le vocable "logique naturelle" pour désigner l'ensemble de cette construction théorique, ce qui demeure cohérent avec la définition citée ci-dessus à mon avis, du fait qu'une "étude des opérations de pensée qui sont en œuvre dans l'élaboration d'une schématisation" ne peut se faire sans une théorisation beaucoup plus large, des processus de communication, de pensée, et sans une épistémologie spécifique, comme je l'argumente de manière plus détaillée dans les prochains paragraphes.

construits, et de rendre compte de son propre outillage, à l'instar de l'épistémologie perspectiviste dont j'ai montré qu'elle pouvait s'appliquer à elle-même (pour l'argumentation de cette idée, voir : Giere, 2006). Or, cette particularité est à mon avis indispensable à une recherche portant sur l'apprentissage et sur les connaissances, car étudier l'acquisition de connaissances sans pouvoir théoriser la connaissance - y compris celle que l'on produit en tant que chercheur - conduit à d'inextricables complications dans la pratique de la recherche.

Ainsi, le méta-langage de la logique naturelle, composé d'opérations logico-discursives qui permettent d'analyser la manière dont un locuteur fait usage d'un terme, constitue un outillage d'analyse relié au cadre épistémologique choisi, permettant par exemple de distinguer si un élève a plutôt construit une *notion* ou un *concept* dans sa schématisation. Les opérations logico-discursives sont elles-mêmes utilisables à deux niveaux : en tant que proposition théorique du fonctionnement psychologique de la pensée opérant sur la langue vernaculaire, et en tant qu'instrument d'analyse des usages singuliers de cette langue vernaculaire pour faire des hypothèses sur le sens particulier qu'un locuteur donne aux termes linguistiques utilisés dans une situation.

La majorité des recherches faisant usage de la logique naturelle (en particulier les recherches du Centre de Sémiologie de l'Université de Neuchâtel) s'orientent vers le développement de la construction théorique qui y est relative. La prochaine section est consacrée à présenter brièvement ces travaux.

Ce n'est pas notre objectif ici d'étudier les opérations de pensée de manière à développer la logique naturelle, mais plutôt d'en *utiliser* les outils déjà établis afin d'aborder le problème des *situations de malentendu* en milieu scolaire. Je présenterai donc par la suite (voir section 3.3.6, p. 210 et suivantes) plus particulièrement mon usage de ces outils. Cette recherche n'est donc pas une recherche *sur* la logique naturelle, même si je proposerai à l'occasion de mes usages quelques modestes développements des outils de la logique naturelle, essentiellement dans un but praxéologique visant à simplifier son usage.

3.3.2 Brève histoire de la logique naturelle

3.3.2.1 Ancrage dans le projet d'épistémologie génétique de Jean Piaget

La logique naturelle a été développée par Jean-Blaise Grize, à la suite de sa collaboration avec Jean Piaget et Antoine Culioli, entre autres. Pour construire la logique naturelle, Grize reprend plusieurs concepts centraux de la psychologie piagétienne (opérations, schèmes, savoirs et connaissances, explications et justifications, etc.), et des concepts de la théorie des opérations énonciatives de Culioli (notion primitive, opération de détermination, etc.), en plus d'autres emprunts, comme la notation des énoncés de Frege. En fait, malgré son apparente simplicité et sa grande concision, la logique naturelle est ancrée dans de nombreux travaux de disciplines variées. Cette continuation critique et positive d'une longue tradition philosophique et de recherches empiriques se penche sur le problème de la connaissance, ou plus précisément du problème de son acquisition et/ou de sa possibilité chez l'être humain. Retracer cette histoire serait trop long pour notre objet présent, et nous renvoyons le lecteur intéressé à l'essai de Milton Campos qui en fait la narration

à travers la métaphore d'une longue traversée de l'océan : *Traversée* (Campos, 2017). Nous reviendrons par la suite sur la dimension transdisciplinaire des travaux développés autour de la logique naturelle, mais auparavant, permettons-nous un retour aux origines en examinant la manière dont la logique naturelle s'insère dans le projet piagétien d'épistémologie empirique, et le prolonge.

Au Centre international d'épistémologie génétique, l'objectif était de construire une logique formelle, basée sur la logique de Boole, qui permette non seulement de rendre compte des opérations de pensée du niveau de développement le plus abouti, l'intelligence formelle, mais aussi des stades intermédiaires et surtout de la *transformation* des coordinations des niveaux inférieurs aux coordinations plus avancées (Apostel et al., 1963). Grize avait permis à Piaget de formaliser une logique opératoire, mais lors du travail de reprise de l'*Essai* , Grize a remis en question son travail, car il n'arrivait pas à formaliser les groupements (Campos, 2010). Piaget, face aux difficultés soulevées par Grize dans la formalisation de la logique opératoire, conclut que son modèle est seulement *possible*, mais continue de le développer comme une logique formelle articulée autour de la notion d'*implication signifiante*. Dès lors, Grize se démarque de Piaget, qui souhaitait une logique formelle pour représenter les transformations des opérations de la pensée, et qui pensait pouvoir adapter les outils issus de systèmes formels tels que la logique des propositions ou les opérations du groupe de Klein.

Il est sans doute inutile de rappeler au lecteur que la logique utilisée par Piaget pour rendre compte des lois de la pensée a suscité de nombreuses critiques pour une vue d'ensemble, voir p.ex. : L. Smith, 1992, portant à la fois sur l'idée d'une structure logique dans l'esprit de l'enfant qui correspond à sa description en logique (formelle) (voir p.ex. : Atkinson, 1983, 2006, pp. 83-85), et sur l'usage que Piaget fait de la logique, considéré comme peu orthodoxe voire inadéquat (Ennis, 1976 ; Freudenthal, 1973 ; Kneale, 1952 ; Rotman, 1977).

Papert (Apostel et al., 1963) répond à plusieurs critiques visant la logique de Piaget en mettant en évidence des méprises similaires sur l'objectif du projet piagétien. Une analyse détaillée de cette problématique dépassant le cadre de la présente recherche, je m'en tiens à la conclusion de la thèse de Ulloa (2006) : en fin de compte, les critiques visant spécifiquement la logique de Piaget mettent en évidence - par l'usage inhabituel que Piaget fait des notations et par les malentendus auxquels ses écrits ont donné lieu - le besoin pour le projet piagétien d'une *autre* logique. Piaget avait besoin d'une logique non monotonique, qui permette de rendre compte de changements au cours du temps. En effet, son projet intellectuel consiste à trouver la logique du développement, et celle-ci ne peut se faire avec des outils qui ne permettent pas de changement au sein de leur système, ce qui est le cas de toute logique formelle. Quoiqu'il en soit, en adoptant et en modifiant - de manière critiquable - les formalismes de son époque, Piaget a posé les premiers pas vers une logique "naturelle", comme le souligne Apostel dans ce passage :

> *He was too much impressed by the existent formalisms, he did not follow closely enough the contemporary accelerated evolution of logic itself to realise that he was looking for 'the natural logic' that drove formal logicians themselves far away from the classical systems he himself thought unavoidable. However his own search for 'the natural logic' did not make him simply repeat the moves of*

> *others : it let him to new intuitive formalisms, falsely expressed by means of old ones but recognisable as such and recoverable.*
>
> *(Apostel, cité par Ulloa, 2006, p. 73-74)*

Nous sommes cependant en droit de nous demander pourquoi Piaget n'a pas tout simplement abandonné la logique formelle. Cette question complexe nous conduirait dans une longue digression. Une raison tient, me semble -t-il, à ce que Piaget cherchait à faire le lien - à montrer l'isomorphisme [205] - entre une relation entre les significations et la relation de causalité entre les objets du monde physique, qu'il considérait comme l'une des constructions cognitives les plus avancées, ce qui l'a conduit à proposer la relation d'*implication* dans Piaget et Garcia (1987).

Grize, de son côté, arrive à la conclusion que ce n'est pas d'une meilleure logique formelle dont le projet de Piaget avait besoin, mais bien d'une logique qui permette de décrire la pensée usant de langues naturelles, une "logique naturelle". Il se donne alors pour tâche d'expliquer pourquoi les systèmes formels *ne peuvent pas* rendre compte de la pensée naturelle. Ces explications se trouvent dans plusieurs articles de Grize (1982) recueillis dans l'ouvrage *De la logique à l'argumentation*, recueil qui pourrait tout aussi bien s'intituler *De la logique formelle à la logique naturelle*. C'est ainsi que Grize commence à développer une logique naturelle, qui n'a pas pour objectif de permettre des calculs, ni de servir comme modèle, mais de permettre une *description* [206] des opérations de la pensée.

3.3.2.2 Une logique de l'action, non formelle.

Par conséquent, une fois débarrassé des exigences de l'ontologie positiviste, la logique de la pensée n'a plus besoin de correspondre (par isomorphisme) à la logique d'une physique causale (pour la désuétude du concept de *causalité*, voir p.ex. : Kohler, 2014a). Nous souhaitons, au contraire d'un concept unique de *causalité* comme aboutissement de la pensée, une description plus détaillée des diverses relations qui déterminent les coordinations et leurs transformations. C'est ce que Grize propose de faire en réintroduisant les "idées molles" (Grize, 1997), et en constituant la logique naturelle comme logique de l'action :

> *Des réussites logiques aussi éclatantes que celles de Frege et de Russell ont conduit à un certain logicisme, c'est-à-dire à estimer que la solidité d'une connaissance exigeait, sinon de la réduire à la logique, tout au moins de la maintenir à l'abri de toute considération de nature psychologique. Nous ne sommes pas encore entièrement libérés de cette façon de voir, mais je crois que le moment est venu de reconnaître que la connaissance ne tombe pas du ciel mais qu'elle résulte de l'activité humaine et que les lois, mêmes celles de la logique, n'y échappent pas. Ceci me conduit à considérer la logique sous deux de ses aspects, celui de son dynamisme d'une part et je parlerai de* logique-action *; celui des règles qu'elle édicte d'autre part et je parlerai de* logique-système.

205. Voir par exemple la discussion de Bronckart (1999) qui écrit que Piaget était "tout proche de cette solution" (p. 39).
206. Il s'agit évidemment d'une reconstruction par le ou les chercheur(s) procédant aux analyses, comme toute construction d'un *fait* à partir de *traces*, celui-ci dépend - notamment - des outils théoriques employés pour procéder à la reconstruction des *faits*.

> *Goethe par la voix de Faust, Piaget par celle de ses écrits sont d'avis que "au commencement était l'action". Mon propos est de montrer que ce que quelques uns conviennent d'appeler "logique naturelle" est une logique-action.*
>
> *(Grize, 2010, p. 91).*

Grize ouvre le champ d'investigation à des relations d'une autre nature, qui ne répondent pas aux exigences d'une logique formelle mais qui sont ce que l'étude attentive des pratiques nous donnerait [207] à voir. Piaget n'était pas complètement sourd aux critiques de Grize, comme en témoigne le point de vue sur les limites des systèmes formels et de la logique formelle qu'il a exprimé à l'occasion d'une conférence en 1968 :

> *We have been attempting to point out areas in which psychological experimentation is indispensable to shed light on certain epistemological problems, but even on its own grounds there are a number of reasons why formalisation can never be sufficient by itself. I should like to discuss three of these reasons.*
>
> *The first reason is that there are many different logics, and not just a single logic. This means that no single logic is strong enough to support the total construction of human knowledge. But it also means that, when all the different logics are taken together, they are not sufficiently coherent with one another to serve as the foundation for human knowledge. Any one logic, then, is too weak, but all the logics taken together are too rich to enable logic to form a single value basis for knowledge. That is the first reason why formalisation alone is not sufficient.*
>
> *The second reason is found in Gödel's theorem. It is the fact that there are limits to formalisation. Any consistent system sufficiently rich to contain elementary arithmetic cannot prove its own consistency. So the following questions arise : logic is a formalisation, an axiomatisation of something, but of what exactly ? What does logic formalise ? This is a considerable problem. There are even two problems here. Any axiomatic system contains the undemonstrable propositions or the axioms, at the outset, from which the other propositions can be demonstrated, and also the undefinable, fundamental notions on the basis of which the other notions can be defined. Now in the case of logic what lies underneath the undemonstrable axioms and the undefinable notions ? This is the problem of structuralism in logic, and it is a problem that shows the inadequacy of formalisation as the fundamental basis. It shows the necessity for considering thought itself as well as considering axiomatised logical systems, since it is from human thought that the logical systems develop and remain still intuitive.*
>
> *The third reason why formalisation is not enough is that epistemology sets out to explain knowledge as it actually is within the areas of science, and this knowledge is, in fact not purely formal : there are other aspects to it. In this context I should like to quote a logician friend of mine, the late Evert W. Beth. For a very long time he was a strong adversary of psychology in general and the introduction of psychological observations into the field of epistemology, and by that token an adversary of my own work, since my work was based on psychology. Nonetheless, in the interests of an intellectual confrontation, Beth did us the honour of coming to one of our symposia on genetic epistemology and looking more closely at the questions that were concerning us. At the end of the symposium he agreed to co-author with me, in spite of his fear of psychologists, a work that we called Mathematical and Psychological Epistemology. This has appeared in French and is being translated*

207. L'usage du conditionnel tient à ce que ce travail, comme nous allons le voir, est encore à faire.

> *into English. In his conclusion to this volume, Beth wrote as follows : "The problem of epistemology is to explain how real human thought is capable of producing scientific knowledge. In order to do that we must establish a certain coordination between logic and psychology." This declaration does not suggest that psychology ought to interfere directly in logic - that is of course not true - but it does maintain that in epistemology both logic and psychology should be taken into account, since it is important to deal with both the formal aspects and the empirical aspects of human knowledge.*
>
> *(Piaget, 1968, pp. 6-7)*

En comprenant ainsi le projet de Grize, la logique naturelle s'intègre parfaitement à la psychologie génétique et permet de poursuivre l'œuvre, mais à condition (1) de renoncer à établir les opérations de pensée dans un système formel, sans sujets, universel, isolé des contenus qui ont servi à sa construction et atemporel, c'est-à-dire incapable de se changer lui-même (monotonique), ce qui implique d'abandonner la recherche d'un isomorphisme entre la causalité ontologique positiviste et un système formel hérité de l'empirisme logique ; et (2) de redonner au langage une place constitutive de la pensée (et même si celle-ci le précède ontogénétiquement) d'une manière qui permettent effectivement de suivre la thèse piagétienne que les opérations de pensée ont leur origine dans l'action, dans le sens où l'action langagière est l'action privilégiée qui manipule des objets de pensée. La logique naturelle peut alors jouer le rôle de mettre en évidence les "lois de la pensée", car celles-ci ne sont plus considérées comme des lois formelles abstraites du temps et de leur contenu (autant que faire se peut). La logique naturelle prend au sérieux la limite des systèmes formels mise en évidence par Gödel (Grize, 1996, p. 56), et en se constituant sous la forme d'un système ouvert, elle est capable de prendre en compte la pensée dans son interaction avec l'extérieur (l'environnement, le social, etc) qui la particularise, et comme un processus inscrit dans le temps - une dynamique - dont les règles et usages eux-mêmes se constituent dans l'interaction avec l'extérieur, et peuvent se transformer de manière ouverte en tenant compte de l'activité des sujets. Une conséquence fondamentale de cette ouverture est qu'un tel système peut contenir des contradictions (Grize & Piérault-Le Bonniec, 1983). Or, il est bien connu en psychologie sociale combien notre système cognitif contient des contradictions de toutes sortes, et que cela ne le perturbe souvent pas, sauf dans quelques cas où elles sont socialement établies comme des contradictions (Festinger, 1957), et encore, cela ne suffit souvent pas à les dépasser.

Ces "lois de la pensée" ne sont donc pas données une fois pour toutes, et sont au moins en partie acquises par l'activité discursive : elles sont donc indissociablement liées au langage et à son fonctionnement, et elles sont sociales dans leur constitution même. La logique naturelle peut nous aider à les décrire, notamment à travers ses opérations, et à mettre en évidence comment elles se co-construisent voire peut-être même à trouver quelques régularités dans les usages.

3.3.2.3 Un retour aux sources de la logique : l'argumentation.

Grize, ayant établi le projet de la logique naturelle par rapport à la logique en général, présente un programme de recherche directement adressé aux disciplines des sciences humaines qui s'intéressent à la

pensée. Dans son texte *Vers un psycho-logique*, Grize (1982) présente quatre domaines où la recherche empirique permettrait d'enrichir la logique (naturelle) :

> *Les faits dont la connaissance serait susceptibles d'offrir aux logiciens l'occasion et la possibilité d'élargir leur science en l'assouplissant et, par là-même, de la mettre à disposition d'autres utilisateurs qu'eux-mêmes, sont légion. Aussi est-ce assez arbitrairement que je propose les quatre catégories suivantes. Leur choix est de nouveau commandé par une problématique logique, c'est-à-dire que, dans chacun des domaines, le logicien (au sens large du terme) possède un certain savoir, dont il a pu s'assurer qu'il était largement inadéquat. Par ailleurs, il s'agit de domaines dans lesquels il ne semble pas* a priori *impossible d'instaurer une expérimentation rigoureuse.*
>
> *(Grize, 1982, p. 125)*

Les quatre domaines que retient Grize sont les suivants :

1. L'étude de l'argumentation.
2. L'analyse des langues naturelles.
3. Les modalités.
4. Le temps.

Si Grize nous a laissé quelques publications sur la problématique du temps, il s'est surtout attelé à l'étude de l'argumentation, suivant lui-même son programme de recherche. Il débute cette étude avec Georges Vignaux (Vignaux, 1976), l'un de ses premiers collaborateurs au Centre de recherches sémiologiques. Vignaux voulait limiter son objet de recherche au discours, mais Grize s'intéresse à l'argumentation avec l'objectif de Piaget en tête, ayant trait à une logique de la pensée. Il définit la logique naturelle en tant que logique de *la pensée telle qu'elle se communique*. L'idée centrale tient à ce que la pensée peut certes être muette, privée, mais toute communication est aussi un processus de pensée. Ainsi, en étudiant les opérations logico-discursives nous étudions également la pensée. Certes, pas *toute* la pensée, mais la pensée néanmoins, et vu la rapport complexe entre langage et pensée, il n'est pas interdit de considérer que celle-ci, même si elle est parfois antérieure au langage comme le défendait Piaget, elle demeure indissociable du langage dès ses premières acquisitions. Plus spécifiquement au milieu scolaire, comme nous l'avons vu, c'est précisément le développement d'une pensée chez les élèves par la médiation d'une communication essentiellement langagière - l'enseignement - qui pose de redoutables problèmes méthodologiques aux chercheurs qui s'y intéressent.

L'intérêt initial de Grize pour l'argumentation s'explique par un retour aux sources de la logique, qui lui apparaît comme l'alternative recherchée aux développements modernes de la discipline qui en ont fait une science du formel uniquement. C'est ainsi qu'il introduit, en parlant de l'évolution de la logique mathématique - depuis Boole et Morgan en 1847 - en une logique formelle de systèmes *sans sujets*, *atemporels* et *universels*, un retour à une logique plus ancienne qui s'intéressait à la pensée de sujets, de particuliers, agissant dans leur contexte "naturel" et produisant une pensée singulière :

> *La logique, cependant avait rêvé d'être autre chose. Port-Royal traitait de* L'art de penser *et, en 1854, Boole écrivait* An investigation of the laws of thought*. Peut-être est-il prématuré de chercher à réunir ainsi la plus grande rigueur à l'imprévisible de la pensée créatrice. Toujours est-il que le psychologisme a effrayé les meilleurs esprits. (...)*
>
> *C'est peut-être bien J. Piaget qui, le premier, est revenu à la logique comme à "la théorie formelle des opérations de pensée". Encore faut-il reconnaître que ce ne fut pas sans quelques difficultés.*
>
> *(Grize, 1982, p. 26)*

Et, plus loin dans le même texte, Grize introduit l'argumentation comme un objet de recherche fondamental pour la logique, qui se situe à la base même de l'élaboration de systèmes formels :

> *Ainsi, parce qu'elle est discours, l'argumentation oblige à sortir de la logique mathématique et à concevoir une logique qui prenne en compte la présence de sujets actifs. Il s'ensuit plus d'une conséquence. (...)*
>
> *L'argumentation qu'un orateur déploie pour et avec son auditoire apparaît ainsi comme une organisation vivante et peut être pensée en termes d'équilibrations locales et successives entre des assimilations de toutes sortes de préconstruits plus ou moins généraux et des accommodations spécifiques aux finalités et aux circonstances. Il est vrai que l'on pourrait en dire autant des formalisations, à condition de les saisir dans leur élaboration et non dans les modèles qui en résultent. Cela revient à reconnaître qu'on ne construit pas un langage logique sans se servir d'une langue d'usage. On retrouve donc les théorèmes de limitations et la preuve que la logique mathématique est subordonnée à celle du discours.*
>
> *(Grize, 1982, p. 28-29)*

Le choix de s'intéresser à l'argumentation est donc intrinsèquement lié au problème de la logique formelle qui ne parvient pas à rendre compte de la pensée. La manière dont Grize introduit la recherche sur l'argumentation à l'aide de la logique naturelle mérite quelques commentaires relatifs à notre projet dans cette recherche. Tout d'abord, il faut remarquer que l'étude de l'argumentation telle qu'elle est envisagée ci-dessus n'est pas seulement une étude de l'emploi du langage (ou d'autre chose) pour persuader autrui, ni même uniquement celle de la pensée telle qu'elle se donne à voir, mais ouvre également à l'étude de la construction de connaissances aussi élaborées que la logique mathématique. C'est dire que l'objet nous intéresse à double titre pour notre travail :

— premièrement, en tant qu'étude de l'interaction entre énonciateur et auditeur ou auditoire, comprenant les multiples dimensions des situations de malentendu ;

— deuxièmement, en tant qu'étude du processus de co-construction de schématisations, dont certaines constituent des savoirs ou visent la connaissance, puisque le milieu scolaire est institutionnellement orienté vers l'apprentissage de savoirs spécifiquement choisis dans ce but.

Ensuite, nous souhaitons attirer l'attention sur le fait que Grize considère comme une connaissance établie, par démonstration [208], que la logique mathématique dépend pour son élaboration d'une langue d'usage - et par conséquent des opérations dont la logique naturelle se propose de faire l'étude. Les théorèmes de limitations auxquels Grize fait référence dans l'extrait ci-dessus, ne peuvent pas être ignorés sous prétexte de ne faire que de la science empirique et de ne pas être philosophe [209]. Les ignorer exige de les réfuter, ce qui n'a pas été fait jusqu'à ce jour. Pourtant, l'ignorance de ces théorèmes conduit souvent les chercheurs à endosser naïvement et implicitement une position épistémologique proche de l'empirisme logique. Ainsi, comme le montre Grize, ces théorèmes ont des conséquences pour le chercheur en psychologie. Par exemple, il est désormais inadéquat de considérer le processus d'acquisition d'un corps de connaissances constitué dans un système formel, comme la dynamique newtonienne qui nous occupe dans cette recherche, uniquement à l'aide d'un langage issu de ce système formel. C'est pourtant ce qu'assument implicitement les recherches qui ne distinguent pas entre la signification conventionnelle d'un terme linguistique (p.ex. *force*), l'usage qu'en fait un élève au cours du processus d'appropriation du concept qui y correspond, et le sens qu'il prend pour celui qui maîtrise les savoirs axiomatisés et fait usage du concept en référence à un système formel, (p.ex. l'enseignant).

3.3.2.4 Un développement théorique transdisciplinaire.

Grize a notamment construit la logique naturelle dans l'esprit d'offrir un outil au psychologue ou au sociologue s'intéressant à la pensée qui se communique. Plusieurs textes du recueil *De la logique à l'argumentation* (Grize, 1982) développe l'idée d'une logique empirique, et de son usage par les sciences humaines, et plus récemment, le résumé sur le quatrième de couverture de l'ouvrage *Logique naturelle et communication* (Grize, 1996) montre clairement cette orientation de la logique naturelle. Le programme de recherche de Grize va même au-delà d'une logique empirique, car en reprenant les grands traits du projet piagétien d'une logique de la pensée, il se doit d'être transdisciplinaire :

> *L'étude de la logique naturelle, de quelque façon qu'on l'aborde, ne saurait être l'objet d'une seule discipline. Certes, le logicien a son mot à dire, mais tout autant l'informaticien, le linguiste, le psychologue, le sociologue et peut-être bientôt le biologiste.*
>
> *(Grize, 1987, p. 53)*

Cette transdisciplinarité se retrouvent parmi les nombreuses contributions à la logique naturelle. Marie-Jeanne Borel a développé les fondements de la logique naturelle en sciences du langage (Borel, 1979 ; Borel, Grize, & Miéville, 1992, p. ex.), notamment en relation à l'œuvre de Frege qui y joue un rôle important. Denis Miéville, en logique, a surtout travaillé à la méréologie de Leśniewski qui a inspiré les classes-objets (Miéville, 1984 ; Miéville & Vernant, 1996), et en plus de ses premiers travaux d'analyse en logique naturelle, il a proposé des formalisations en vue d'une axiomatisation future de la logique naturelle

208. Il fait ici référence aux théorèmes de Gödel.
209. A ce sujet, voir aussi Ladrière (1957).

(Miéville, 1989, 1997) [210]. Plusieurs collaborateurs de Grize s'orientent vers la logique formelle, malgré leur contribution à la logique naturelle. Par exemple, le logicien Desclés, après une thèse en logique naturelle, s'est dirigé vers la déduction naturelle pour s'intéresser ensuite à la logique formelle. Les travaux de Miéville ne s'orientent pas seulement vers la formalisation, car il continue de faire vivre le projet transdisciplinaire de son prédécesseur, à l'articulation de la logique naturelle et des sciences humaines. Il propose par exemple d'utiliser la méréologie pour modéliser les changements de connaissances Miéville (1981) [211]. Cette voie offre une alternative aux logiques mieux connues, comme la logique des prédicats. Bien que la déduction naturelle et la logique des prédicats constituaient un des points de départ du projet de Grize, elles ne s'y s'intègrent pas facilement aujourd'hui, puisque la logique naturelle ne vise pas le calcul des valeurs de vérité.

La logique naturelle est reprise et discutée par Caron dans son ouvrage de psycholinguistique (Caron, 1983). Le psychologue piagétien Emilio Gattico intègre l'apport de la logique naturelle à l'épistémologie génétique dans ses publications (Gattico, 1993, 1997, 2010). Giovanni Busino (Busino, 1987, 1997) met en évidence l'importance que revêt le projet de Grize dans l'histoire des sciences humaines en incarnant une position qui dépasse de vieux antagonismes, et met en relation sa position avec les écrits de Habermas. Plusieurs auteurs (Aqueci, 1997 ; Campos, 2017) ont trouvé dans la logique naturelle de quoi prolonger une réflexion éthique, ou morale, à la suite des travaux du jeune Piaget. Milton Campos relit l'œuvre de Grize en montrant en quoi elle constitue un théorie de la communication (Campos, 2017), qui permet non seulement de poursuivre l'œuvre piagétienne mais aussi d'étudier de nouveaux domaines et, surtout, de relier des champs de recherche qui restent, aujourd'hui encore, isolés les uns des autres [212].

3.3.2.5 Un programme de recherche en cours.

Inscrire la logique naturelle dans une approche transdisciplinaire vise à en faire un outil pour l'analyse, non seulement de discours écrits, mais aussi de l'oral, et surtout de la pensée en construction. Grize et Piérault-Le Bonniec (1983) l'affirment très clairement dans ce passage : "L'étude d'argumentations plus spontanées - en particulier orales - et celles d'enfants ou d'adolescents constituera une étape ultérieure" (p. 9).

Cette étape n'a malheureusement jamais eu lieu, à ma connaissance. En effet, si les contributions théoriques à la logique naturelle sont nombreuses, le programme de recherche empirique n'a que peu été repris parmi les collaborateurs et élèves de Grize. Quelques travaux de la première heure se sont intéressés à décrire des schématisations dans le monde de l'éducation (Grize et al., 1970-1972 ; Miéville, 1979, 1981), mais uniquement à partir de sources écrites, notamment des manuels de physique. D'autres travaux proposent des alternatives aux opérations telles qu'elles ont été développées par Grize (Apothéloz, 1997 ; Desclés, 1997 ; Miéville, 1997), mais sans les faire fonctionner sur des corpus. Vergès a utilisé la logique

210. Je ne reprends cependant pas dans mes analyses les propositions de Miéville qui tendent à faire de la logique naturelle une logique formelle, qui me ferait perdre les avantages pour lesquels je l'ai choisie.
211. Nous pourrons ainsi décrire à plusieurs occasions le recouvrement partiel des classes-objets, lors des analyses des situations de malentendu.
212. Par exemple, le développement moral, cognitif, et affectif de l'enfant.

naturelle dans ses enquêtes sociologiques (Apothéloz, Miéville, & Vergès, 1989 ; Vergès, 1997, 2010), et avait pour projet de développer un programme d'aide à l'analyse des données (sous Windows) utilisant les opérations de la la logique naturelle, mais ses publications ne présentent pas d'analyse utilisant en détail les opérations de la logique naturelle ni aucune trace du programme informatique. Plus récemment, d'autres travaux utilisant les outils de la logique naturelle pour l'analyse de corpus enregistrés depuis l'oral ont été publiés (Grize & de Montmollin, 2008 ; Piérault-Le Bonniec, 1997), mais les analyses ne portent que sur le niveau des configurations ou du raisonnement, sans entrer dans le détail des opérations de la logique naturelle. L'article de Campos (2010) constitue une exception notable : l'auteur utilise les opérations de la logique naturelle dans le détail, et l'applique à un corpus cinématographique dans l'objectif d'étudier la construction des *images*[213] dans la schématisation. Même si le champ de recherche de Campos est très spécifique, il s'agit là d'un exercice qui met en œuvre une analyse de conversations orales (en plus du support cinématographique) qui utilise toute la richesse du modèle des opérations de la logique naturelle. Cette publication a contribué à la mise en place de l'usage que je proposerai de la logique naturelle dans cette recherche, qui étend également les usages connus de la logique naturelle à des matériaux oraux et conversationnels, puisqu'elle se donne pour objectif d'analyser les interactions entre élèves et enseignants.

Les membres actuels de COMMUNALIS, la Société internationale de la logique naturelle, comme Emilio Gatttico en Italie, Monica Rabello de Castro au Brésil ou Milton Campos au Canada, continuent de développer la logique naturelle, et - comme nous venons de le voir avec l'analyse de Campos d'une scène cinématographique - le temps est arrivé pour la logique naturelle de développer son projet de recherche empirique. Cette thèse est une contribution à cette nouvelle étape. En effet, d'après le brève revue des travaux effectués en logique naturelle, il apparaît qu'il n'existe aucune publication faisant usage de la logique naturelle dans l'analyse de la pensée en construction à travers un corpus de conversations orales en milieu scolaire.

3.3.3 Une théorie de la connaissance

Nous allons à présent présenter - de manière fort partielle - quelques éléments de la théorie de la connaissance que Grize établit et dont la portée est certainement beaucoup plus vaste que je ne suis en état de le discuter ici. Ces éléments sont utiles à cette recherche pour deux raisons au moins :

— premièrement, afin d'établir nos outils de travail, c'est-à-dire comme vocabulaire spécialisé, et qui permet également de disposer d'une théorie de la théorisation pour rendre compte de mon propre travail de théorisation au cours de cette recherche ;

— deuxièmement, en tant que théorie de référence pour aborder les contenus de l'apprentissage des élèves, c'est-à-dire pour spécifier ce que sont les savoirs à enseigner, les savoirs enseignés et les connaissances acquises par les élèves.

213. Ce concept est expliqué plus loin.

Le deuxième point ci-dessus sera repris dans une section spécifique de la discussion des résultats (voir chapitre 7, section 8, p. 709 et suivantes) : la théorie de la connaissance de Grize nous permettra de revenir sur la question des rapports complexes entre savoirs de physique, savoirs à enseigner dans la discipline scolaire de la physique, savoirs enseignés et connaissances des élèves, eu égard aux observations effectuées au cours de la recherche et, en particulier, aux difficultés que rencontrent les élèves lors des situations de malentendu.

3.3.3.1 Notions, concepts, théorie et langages formels

Notions et *concepts* sont systématiquement distingués[214] par Grize (1982, 1990, 1996), comme faisant référence à des "jeux de langue" différents, selon l'expression empruntée à Wittgenstein (1958, §7, cité par Grize 1996, p. 47) et qui se place dans une perspective métalinguistique. Pour (Grize, 1990, p. 22), "une notion s'exprime par un nom commun qui, du point de vue logique, est de la même catégorie que les propriétés et les classes". La classe-objet - permettant d'aborder l'échelon du mot-signification - permet justement de représenter les *notions* dans le sens où elles sont utilisées par les interlocuteurs. Le concept, quant à lui, relie différent types de connaissances, comme nous l'avons vu dans l'approche cognitive (voir section 3.2.4, p. 126), et nécessite un usage technique de la langue pour assurer cette fonction cognitive.

Voici de brèves définitions pour établir cette distinction :

Une notion est ce que désigne l'usage d'un terme de la langue quotidienne : elle est caractérisée par le fait qu'elle est toujours entourée d'une zone de flou, n'étant que partiellement déterminée, et "qu'il est possible de considérer des voisinages entre elles" (Grize, 1996, p. 47), dans "un sens assez large pour englober la métaphore" (*ibidem*).

Un concept résulte des "usages techniques et scientifiques de la langue" (Grize, 1996, p. 48), usages qui se distinguent de l'usage quotidien par le fait qu'ils obéissent à des règles d'usage, précisées dans des définition qui tendent à l'exactitude, sans jamais l'atteindre totalement puisque leurs définitions font aussi usage de notions avec le flou qui les entoure. Pour Grize, la particularité d'une langue technique et scientifique consiste à permettre "d'y raisonner *more geometrico*" (*ibidem*).

Cette distinction n'est pas sans rappeler celle de Vygotski entre *concepts quotidiens* et *concepts scientifiques*. La distinction de Vygotski est basée sur plusieurs critères qui font que, au final, l'opposition est excessive (Vergnaud, 1999, p. 53), ce que Grize souligne aussi en montrant que les concepts conservent une dépendance - que je qualifierais de *génétique* - envers les notions qui ont permis leur construction en tant que concept et que, à ce titre, il conserve toujours un peu de ce "flou" propre à la notion. Je pourrai néanmoins faire un emploi méthodologique de cette distinction, et établir le lien entre cette distinction et l'apprentissage des élèves, *via* la théorie de la *conceptualisation* de Vergnaud.

214. Un commentaire réflexif sur mes propres pratiques : vu l'importance de cette distinction, j'ai pris la liberté de faire un abondant usage de l'italique dans mon écriture, où il est utilisé pour rendre attentif à mon usage d'un terme en tant que concept. Ainsi, je peux discuter de la force, et ce sera une notion exprimée par le nom commun, ou discuter de la *force*, et je fais alors référence au concept de la physique, par exemple.

Ce lien est d'autant plus facile que la définition des *notions* de Grize est ancrée dans la psychologie de Piaget :

> *Je rappellerai que, dans le cadre de la logique naturelle, on a toujours affaire à des notions, ce que Piaget appelle des "schèmes d'actions complexes" [PIAGET 1946 : 233].*
>
> *(Grize, 1990, p. 41)*

Il y a donc une proximité entre les *notions* selon Grize (1990) et les *concepts-en-acte* de la théorie de la conceptualisation de Vergnaud. Je n'examine pas ici toutes les questions de détail que soulèverait l'intégration des deux théories, car pour cette recherche il me suffit de pourvoir faire le lien entre les connaissances que les élèves acquièrent, selon la typologie néo-piagétienne présentée en amont (voir section 3.2.4, p. 126 et suivantes), et les savoirs académiques, les savoirs à enseigner et les savoirs enseignés que la théorie de la connaissance de Grize permet de caractériser.

Selon la définition de Grize des *notions* et *concepts*, il y a une différence de degré entre les deux, de degré de technicité et de rigueur dans l'usage précis des *concepts* par rapport à l'usage imprécis des *notions*. Lorsque ce degré est suffisamment élevé pour que l'on puisse raisonner *more geometrico*[215], nous disposons d'un *langage* plutôt que d'une langue vernaculaire. Parmi ces *langages*, les *langages formels* au sens strict sont ceux qui "traitent de façon entièrement séparée la syntaxe et la sémantique", ce qui n'est guère le cas ailleurs qu'en mathématique et en logique. Néanmoins, il est aussi possible de considérer comme un *langage formel*[216] (au sens large cette fois) celui qui n'utilise que des *concepts* définis les uns par rapport aux autres, dont les plus fondamentaux dépendent directement de quelques *axiomes*, sans plus faire aucune référence à des *notions*, ni d'ailleurs à un contexte particulier. Nous allons à présent examiner de plus près les conséquences de la constitution d'un système formel, c'est-à-dire l'expression d'un corps de connaissances dans un *langage formel*.

3.3.3.2 Systèmes clos et systèmes ouverts

Dans son texte fondateur sur cette question, publié pour la première fois en 1958 alors même qu'il rejoint le Centre d'étude d'épistémologie génétique, puis repris dans le recueil de *De la logique à l'argumentation*, Grize (1982) introduit le problème de la manière suivante :

> *L. von Bertalanffy élaborait une biologie théorique et se servait pour cela d'une "théorie générale des systèmes". On en distingue de deux sortes : les systèmes clos du genre de ceux de la thermodynamique et les systèmes ouverts qui doivent rendre compte du comportement des organismes vivants. Or les systèmes formels, objets d'étude de la logique, sont par définition des systèmes fermés. Les ensembles qui les constituent sont introduits à l'aide de définitions inductives et celles-ci se terminent toujours par une clause, dite finale, de la forme : "Et rien n'est élément de l'ensemble en question, sinon par ce qui précède."*

215. C'est-à-dire, selon notre compréhension de Grize, de rendre l'usage des termes pratiquement indépendant des utilisateurs.
216. La logique naturelle ne propose pas non plus un *langage formel* dans ce sens-là, en tout cas pas dans l'état actuel des travaux.

> *Les conséquences épistémologiques de cet aspect de fermeture sont considérables. C'est sur lui que repose la possibilité, non seulement de démontrer les diverses propriétés des éléments des ensembles considérés, mais encore tous les théorèmes de limitation dont celui de Gödel est le plus fameux. C'est à lui aussi que les preuves doivent leur caractère de nécessité et c'est enfin lui qui commande toute la démarche formalisante elle-même. Il s'ensuit que celui qui se propose de formaliser un corps de connaissances, d'en élaborer un modèle au sens fort, ne saurait oublier que, son travail une fois achevé, le résultat ne lui appartient plus. Il a dû concevoir tous les possibles* une fois pour toutes.
>
> *Il y a plus encore. Si les modèles sont des objets indépendants de leur créateur, ils le sont tout autant de leurs utilisateurs potentiels et c'est d'ailleurs pourquoi leur exploitation peut être confiée à des machines. Mais ceci impose des contraintes très fortes : un modèle doit être hors de toute situation et ne jamais rien devoir à quelque implicite que ce soit. On a donc affaire à des systèmes sans sujets, atemporels et universels.*
>
> *(Grize, 1982, pp. 25-26)*

De cette dernière conséquence, Grize va conclure qu'il faut autre chose pour une logique de la pensée : un logique *non formelle*, fonctionnant comme un système ouvert. Afin de construire cette logique, il va revisiter l'histoire et la philosophie des sciences du point de vue du logicien, afin de se doter de ce que nous avons choisis de nommer ici *une théorie de la connaissance*, c'est-à-dire qu'il va redéfinir des notions rarement définies comme *théorie*, *modèle*, *explication*, en discutant leur place dans le processus de construction de nouveaux savoirs (scientifiques).

3.3.3.3 Axiomatisation et modèles

Des nombreux textes concernant ce qu'est une théorie, je ne vais présenter que trois extraits des ouvrages de Grize qui apportent chacun un éclairage différent mais également utile. Ce choix permet d'évoquer l'étendue des intérêts de l'auteur et les multiples dimensions de son travail. Le premier extrait présente l'idée de théorie en tant qu'origine du système formel, et permet de faire le lien avec le paragraphe précédent mais aussi d'introduire ce que sont l'*axiomatisation* et l'*abduction*, termes dont j'aurai besoin par la suite. Le second extrait décrit la structure d'une théorie, et discute le processus de théorisation. Le troisième extrait distingue *théorie* et *modèle*.

> *La notion [de système formel], au sens moderne du terme, s'est dégagée par une suite d'abstractions de celle, plus concrète, de* théorie. *Nous appellerons "théorie" au sens large tout ensemble d'énoncés vrais relatifs à des objets donnés. Sans doute, comme la psychologie génétique l'a montré dans le détail, ces objets et leurs propriétés, quelques élémentaires qu'ils puissent apparaître à l'adulte civilisé, ne sont jamais immédiatement donnés. Ils résultent d'une élaboration fort complexe. Partons cependant du niveau où il est possible d'énoncer un certain nombre de faits vrais à propos de certains objets, c'est-à-dire de faits en accord avec l'observation courante. Il apparaît alors assez rapidement que les propositions qui constituent une théorie, prise en ce sens, ne sont pas toutes indépendantes les unes des autres. Cela signifie d'une façon plus précise que, certaines de ces propositions étant connues, il est possible de connaître les autres sans plus recourir à l'observation. Cette constatation ouvre la voie à tout un travail d'organisation qui conduit à une* axiomatisation

de la théorie. Il faut tout d'abord dégager un groupe de propositions indépendantes les unes des autres, les axiomes, *dont toutes les autres, les* théorèmes, *peuvent se déduire. Remarquons qu'à ce niveau il convient de parler davantage d'une découverte des axiomes que d'un choix. C'est que ceux-ci sont en effet soumis à des conditions pratiquement très sévères : ils doivent être vrais, ils doivent rendre compte (au moins) de toutes les autres propositions actuellement connues et, enfin, ils doivent être évidents.*

(Grize, 1982, pp. 38-39)

Les propos retranscrit ci-dessus sont accompagné d'un schéma du processus d'axiomatisation, reproduit dans la figure 3.2 ci-dessous.

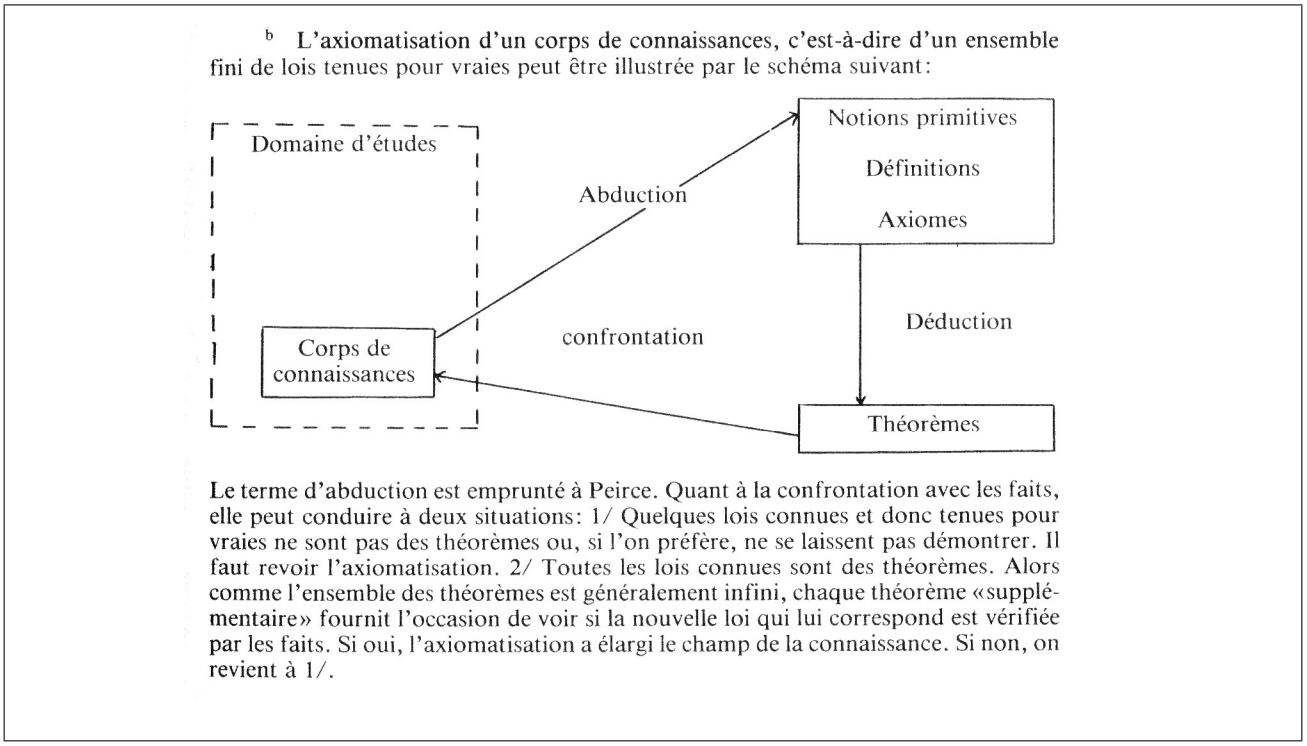


FIGURE 3.2 – Illustration de l'axiomatisation d'un corps de connaissances selon Grize (1982, p. 39).

Dans cet extrait, Grize explique ainsi comment on obtient un système formel à partir d'une *théorie axiomatisée*, en vidant ses objets d'une part maximal de leur contenu, notamment tout ce qui fait référence à des états du monde, et en ajoutant une liste exhaustive des règles de déduction permettant de tirer des *théorèmes* à partir des *axiomes*.

Dans l'extrait suivant, Grize définit la structure d'une *théorie* envisagée comme un *système formel*, pour ensuite montrer pourquoi une théorie comprise de la sorte nous laisse insatisfait. Il prend comme point de départ une critique de Jean-Paul Sartre à la science, faite dans l'ouvrage *Critique de la raison dialectique* (1960, p.147). Grize écrit :

Si les théories en usage dans les sciences ont un vice rédhibitoire, ce ne saurait être apparemment ni par manque de cohérence interne, ni non plus parce que l'expérience les tiendrait en échec. Les

> *critiques dont nous sommes partis n'affirment pas que la science fait mal ce qu'elle fait, mais plutôt qu'elle ne fait pas ce qu'on attend d'elle. En d'autres termes, la faiblesse des théories "positivistes et analytiques" ne tiendrait pas tellement à ce qu'elles seraient de mauvais instruments, des outils mal fabriqués ou mal utilisés, mais bien à ce qu'elles ne seraient pas adéquates à la fonction qui est la leur. Reste donc à déterminer cette dernière.Naïvement, on peut dire qu'une théorie a un double rôle. D'une part expliquer les phénomènes observés et d'autre part accroître la connaissance.*
>
> *(Grize, 1982, p. 54)*

C'est au sujet du deuxième rôle que le problème se pose le plus clairement. En effet, Grize montre dans son texte qu'une *théorie*, une fois constituée en *système formel*, ne permet pas de faire "avancer la connaissance", au sens de faire des prévisions, de fournir des suggestions de recherches" (Grize, 1982, p. 54), et ce pour la raison suivante :

> *Dès lors en effet qu'une théorie contient toutes ses conséquences, elle ne saurait fournir encore des faits nouveaux, relativement à elle.*
>
> *(Grize, 1982, p. 62)*

Dans cet extrait, "théorie" est bien entendu pris au sens de "théorie constituée en un système formel". Grize en conclut que, peu importe par où on empoigne le problème, le sujet utilisateur de la théorie finit par réapparaître. Par conséquent, c'est le processus de *théorisation* qui permet l'avancée de la connaissance, et ce processus est bien une activité humaine - et non un *système formel* - comme le souligne l'auteur quelques pages plus loin :

> *Il est vrai qu'une théorie nouvelle s'accompagne de phénomènes nouveaux. Mais c'est là une façon abrégée de décrire les choses. En réalité, c'est la restructuration même de la théorie antérieure qui engendre la nouveauté. Et comme cette restructuration résulte d'une activité humaine, la nouveauté perd enfin son opacité.*
>
> *(Grize, 1982, p. 64)*

En conséquence, il devient envisageable d'étudier ce que sont les savoirs nouveaux pour une culture donné, ou les nouvelles connaissances d'une personne, en étudiant l'activité des sujets qui restructurent une théorie antérieure. C'est précisément ce qui m'intéresse dans cette recherche, dans le but de mieux comprendre ce qui se joue au cours des apprentissages scolaires, quand bien même la restructuration d'une théorie dans une discipline scientifique n'est pas la même chose que la restructuration des connaissances pour un individu particulier.

Examinons à présent le troisième extrait, qui s'éloigne des considérations liées aux *systèmes formels* pour s'intéresser à un concept de *théorie* par opposition à celui de *modèle* :

> *Un modèle peut être considéré comme une construction faite* à propos *de quelque phénomène et non pas simplement* de *ce phénomène. Ceci implique qu'un modèle ne repose pas directement sur des observables, mais sur un ensemble de concepts élaborés par ailleurs. (...)*
>
> *Un modèle repose sur des hypothèses qui sont comme une sorte d'essai au sein d'une théorie où elles sont formulées. (...) Un modèle devient alors une représentation autonome, c'est-à-dire un objet de pensée fermé sur lui-même et qui n'est ni amputable, ni résumable. Tel n'est pas le cas de la théorie qui lui sert de base. Celle-ci est toujours de l'ordre des schématisations et contient donc en elle le principe de son évolution.*
>
> *(Grize, 1996, pp. 52-53)*

Dans ce passage, Grize fait référence à une *théorie* avant son *axiomatisation*, et la distingue d'un *modèle* par le fait de ne pas être autonome. En effet, si le *modèle* peut se conserver malgré le phénomène, pour ainsi dire, une *théorie* doit de son côté s'y adapter. Ainsi, une théorie de l'apprentissage sera complétée, amendée ou révisée lors de faits nouveaux mis en évidence par une observation utilisant cette même théorie pour rendre compte des faits, tandis que pour concevoir un dispositif d'enseignement sur ordinateur il n'est pas nécessaire de disposer d'une théorie de l'apprentissage mais il faut construire un modèle d'apprentissage permettant notamment l'évaluation, peu importe après tout si ce modèle correspond ou ne correspond pas du tout à la manière d'apprendre de ses utilisateurs : c'est un "essai", comme l'écrit Grize (*ibidem*).

Il est par ailleurs reconnu aujourd'hui dans les ouvrages méthodologiques des sciences de l'éducation, que si nous souhaitons effectivement nous intéresser à la valeur d'un *modèle* utilisé dans un tel dispositif d'enseignement, c'est par une démarche différente que nous y parvenons : le plus souvent par un processus en boucle rétro-active entre *design* ou *conception* du modèle et recherche scientifique, comme dans la démarche du *design experiment* (Brown, 1992) ou de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988). À ce moment-là, nous avons besoin d'une *théorie* de l'apprentissage pour pouvoir envisager la vérification des *modèles* en compétition, que Grize réduit à la "détermination de procédures nécessaires à estimer leur adéquation aux phénomènes référentiels qu'ils représentent" (*ibidem*). Il ajoute cette précision utile en guise de synthèse :

> *En résumé, la distinction fondamentale entre les schématisations et les modèles, celle entre les jeux de langue et de langage, consiste en ceci que les premières restent en contact continuel avec le monde, tandis que les seconds s'en détachent totalement après les moments de leur élaboration.*
>
> *(Grize, 1996, pp. 54-55)*

Comme les modèles sont associés aux "jeux de langage" et que, par ailleurs, un *langage* est par définition *formel*, ce passage montre clairement que les *modèles* sont bien des *systèmes formels*, et des *systèmes formels* particuliers dont il faut encore déterminer "leur adéquation aux phénomènes référentiels qu'ils représentent" (*ibidem*). Peut-être pouvons-nous comprendre l'utilisation du terme *modèle* dans cet ouvrage comme la volonté de simplifier quelque peu les propos et bien distinguer entre *théorie non constituée en système formel* et *théorie axiomatisée et constituant un système formel*, utilisant le concept de *théorie* pour la première et de *modèle* pour la seconde.

Nous retiendrons de cette analyse de Grize les points suivants concernant les concepts de *théorie* et de *modèle* :

— tout ensemble d'énoncés vrais relatifs à des objets donnés est une théorie ;

— une théorie est une schématisation ;

— elle contient le principe de son évolution ;

— cette évolution est le processus de théorisation ;

— c'est la théorisation qui amène du nouveau dans la connaissance et non la théorie ;

— une théorie peut être axiomatisée ;

— une théorie axiomatisée peut être formalisée ;

— une théorie formalisée étant fermée, elle n'amène plus rien de nouveau, elle n'est pas un processus, ni une schématisation : elle est un modèle.

3.3.4 Une théorie de la communication

L'approche de la communication de Grize se démarque explicitement de celle qui considère la communication comme une *transmission* ou un *traitement* d'informations. À la métaphore du télégraphe (*codage* - *transmission* d'un message - *décodage*[217]) ou de l'ordinateur (*traitement* d'une information conçue comme physique[218]), Grize préfère la métaphore de la résonance : elle attire l'attention sur la reconstruction du sens par l'interlocuteur, à l'image de la résonance qui restitue les sons émis avec plus ou moins de distorsions. Cette métaphore me semble non seulement plus adaptée à l'étude des situations de malentendu, mais également constituer un *modèle* plus adéquat pour représenter la communication analogique animale dans une théorie organique de la connaissance, les deux métaphores précédentes reposant sur une digitalisation de la communication propre au fonctionnement mécanique des machines. Il y a encore de nombreuses autres raisons qui m'ont convaincu d'adopter cette théorie de la communication, comme son couplage à une sémiologie permettant de faire des aller-retour dans l'analyse entre des phénomènes plus micro (à l'échelon du signe) et des phénomènes plus macro de la communication (p.ex. à l'échelon de la *situation d'interlocution* prise comme un ensemble), et la démarche non formalisante et discursive de l'approche de Grize.

3.3.4.1 Les cinq postulats de la communication.

Grize introduit sa théorie de la communication par cinq postulats, qui vont définir ce que sa théorie prend en considération et sous quel angle, autrement dit sa *perspective* sur la communication.

217. Pour la discussion, voir Grize, 1996, p. 58.

218. En informatique, la matérialité de l'information correspond à un certain voltage correspondant à la valeur du *bit* d'information, 7 ou 12 volts, mais quand on utilise cette métaphore pour théoriser la communication humaine, on "oublie" alors que dans le cas informatique c'est l'être humain qui a décidé, à un moment donné de l'histoire de la technologie, d'accorder à ces voltages définis conventionnellement une valeur de "0" ou "1" permettant d'en *faire* une *information*, de son point de vue.

Pour l'utilisateur de la logique naturelle dans une démarche empirique que je suis, ces postulats spécifient les limites dans lesquelles je peux étudier le phénomène choisi en adoptant cette théorie. Voici une brève présentation de ces postulats (pour la source et une description plus complète, voir : Grize, 1996) :

Le postulat du dialogisme se réfère explicitement à l'idée de Bakhtine que même un discours monologique selon sa forme (comme un cours *ex catheadra*) est *dialogique*, par sa structure sémantique et stylistique, et que "toute énonciation, en contexte ou en situation réels, porte trace, grammaticalement, lexicalement des énonciations d'autres locuteurs, identifiables ou indéterminés, par rapport auxquelles elle est située" (Fiala, 1986, p.18, cité par Grize 1996, p. 61).

Le postulat de la situation d'interlocution met en évidence que toute "communication se déroule au sein d'une situation qui présente deux dimensions" (*ibidem*) : la première est concrète et situe la communication dans un lieu, à un moment particulier, par rapport à l'objectif de l'échange, etc. ; et la seconde est théorique au sens où elle situe la communication dans un cadre socio-historique donné qui influence non seulement le contenu mais aussi la forme de la communication, par exemple en parlant "à la manière de".

Le postulat des représentations considère, sans entrer dans le détail, que tout interlocuteur a des représentations (mentales) au sujet de lui-même, de son interlocuteur, de ce dont il s'agit, et des relations entre lui-même et son interlocuteur, entre son interlocuteur et ce dont il s'agit, etc.

Le postulat des préconstruits culturels attire l'attention sur le fait qu'en utilisant la langue naturelle, on "emprunte" ou mobilise tout un ensemble de savoirs déjà construits au sein de notre culture (ou de celle de notre interlocuteur), que le locuteur s'approprie selon le double processus d'assimilation et d'accommodation décrit par Piaget, car cette appropriation n'est pas uniquement un usage de termes aux significations conventionnelles [219], les connaissances culturelles du locuteur "se colorent de toutes sortes de vécus" (Grize, 1996, p. 65).

Le postulat de la construction des objets pose que le "discours est création de sens et construit pour cela des objets de pensée à partir de la signification des termes dont il se sert" (*idem,* p. 67). Cela "ne va pas sans poser un problème" (*ibidem*) pour Grize qui met en évidence l'importance de considérer la communication comme une *co*construction "qui résulte, sinon du dépassement des points de vue, tout au moins de leur conjugaison" (*ibidem*). Les objets (objets de discours ou référents auxquels ils renvoient) constituent "les *référentiels* du discours" (*ibidem*). Ces objets, en tant qu'objets de pensée coconstruits à partir de la signification des termes utilisés, devrait permettre de dépasser, ou au moins coordonner, la singularité des points de vue [220] par une *schématisation* au moins partiellement partagée.

Des cinq postulats présentés ci-dessus émerge une théorie de la communication originale, où Grize prend en compte non seulement les avancées théoriques des grandes théories linguistiques (de Saussure, Peirce,

219. Comme le considère généralement la philosophie analytique.

220. Le reproche souvent adressé au pragmatisme ou au constructivisme, réputés "subjectifs", est de ne pas permettre de s'entendre au sujet d'objets existants dans le monde : cette partie de la théorie de Grize en fournit la possibilité concrète *dans* et *par* la communication, justement.

etc.), mais aussi de nombreux travaux empiriques qui restent en filigrane de ces postulats, à commencer par l'épistémologie génétique de Piaget, mais aussi par la prise en considération de l'importance des interactions sociales et du fait qu'elles sont situées, de la culture et plus particulièrement du *dialogisme* à la suite de la redécouverte de Vygotski et Bakhtine, notamment. En guise de définition pour la communication, il choisit une formule de Varela :

> *En fait, dans cette perspective, l'acte de communiquer ne se traduit pas par un transfert d'information depuis l'expéditeur vers le destinataire, mais plutôt par le modelage mutuel d'un monde commun au moyen d'une action conjuguée.*
>
> *Varela, 1988, p. 115, cité par Grize, 1996, p. 67*

A la suite de ce passage, Grize ajoute :

> *Toute action suppose une finalité et c'est elle qui va exploiter la part d'indétermination des signes de la langue. Les objets d'une argumentation, et dans une moindre mesure de tout autre discours, sont toujours des objets* ad hoc*, c'est-à-dire préparés pour satisfaire à certains propos. Deux procédures, d'ailleurs liées, sont disponibles : le filtrage et la saillance. Filtrer, c'est retenir quelques aspects des représentations et en occulter d'autres ; les faire saillir, c'est se servir des moyens de la langue pour fixer l'attention.*
>
> *(Grize, 1996, pp. 67-68)*

Le schéma que Grize propose pour étayer sa théorie de la communication (reproduit ci-dessous par la figure 3.3) fait office de synthèse de sa théorie. La forme graphique ne fait cependant pas justice au dynamisme de la conception de la communication que Grize présente dans son discours. En outre, certains aspects, comme la *finalité* de la schématisation, y sont mentionnés mais sans laisser voir la complexité des liens qu'ils entretiennent les uns avec les autres : la *finalité* d'une schématisation, par exemple, mobilise les ressources présentes dans le *préconstruit culturel* de manière imbriquée avec les *représentations* que l'énonciateur a de lui-même - c'est-à-dire "im(A)" sur la figure - de son interlocuteur - "im(B)" sur la figure - et de l'objet du discours - im(T) sur la figure - dans une action stratégique du locuteur qui fait usage de filtrage et de saillance. Quant au postulat du dialogisme, comme Grize le remarque lui-même, rien n'apparaît dans la figure. A cela il faudrait surtout ajouter le développement au fil du temps, qui fait de la schématisation placée au milieu du schéma un processus et un objet mouvant, constamment transformé au fil de l'échange ou du discours.

Malgré ces quelques limites, ce schéma de la communication a le mérite de présenter clairement la double activité des acteurs engagés dans une communication, qu'ils soient en présentiel ou non, et la construction du "monde commun", placé au milieu comme la *schématisation* à partager entre les acteurs impliqués [221].

221. La question de savoir dans quelle mesure la schématisation construite par A est effectivement reconstruite telle quelle par B reste d'ailleurs ouverte, dans le schéma, et ne peut être posée que relativement au processus, c'est-à-dire dans le déroulement temporel des échanges permettant éventuellement un tel partage. En ce sens, le terme "coconstruction" utilisé par (Grize, 1996, p. 67) est à entendre comme une potentialité.

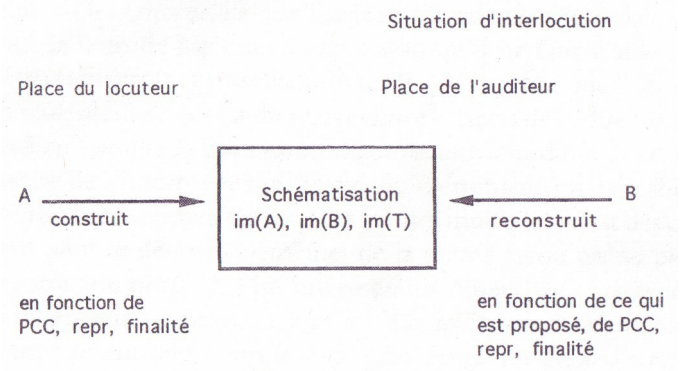


FIGURE 3.3 – Schéma du modèle de la communication (extrait de Grize, 1996, p. 68).

La mention en haut à droite du schéma d'une "situation d'interlocution", nous rappelle que toute communication a toujours lieu dans une situation particulière, ouvrant les processus de communication en cours aux nombreux éléments du cadre et du contexte qui y sont potentiellement utiles : le système est ouvert *vers le haut* par son caractère situé, et *vers le bas* à travers les processus de (re-)construction qui sont fonction des préconstruits culturels ("PCC" sur le schéma), représentations et finalités des interlocuteurs. En outre, la dynamique entre construction et reconstruction de la schématisation intègre une ouverture de deuxième degré dans le schéma, qui est fonction de l'histoire singulière de cette construction et de la ou des reconstruction(s) qui s'ensuivent.

Le concept de *représentation* est utilisés par Grize pour désigner le monde cognitif spécifique à chaque interlocuteur, et celui d'*image* pour désigner le monde discursif relatif à chaque interlocuteur ("im(A)" et "im(B)" sur le schéma) et au sujet de conversation ("im(T)" sur le schéma). Ces images réfèrent notamment aux enjeux identitaires[222] : les images de soi, de l'autre et du sujet de conversation que le discours met en scène. Le schéma affiche également des *aides à la reconstruction*, qui comprennent des formulations comme "j'entends par là", "nous venons de voir que", etc. Celles-ci jalonnent le discours du locuteur dans le but de fournir les meilleures chances à son auditeur de reconstruire la schématisation voulue.

Avant d'aborder plus en détail le concept de *schématisation*, j'ouvre une parenthèse le temps de la prochaine section, afin de discuter du statut de ce schéma, du *modèle* qu'il représente, de la *théorie* de la communication de Grize et de quelques éléments implicites aux postulats présentés ci-dessus.

222. C'est une manière de désigner l'aspect selon lequel la schématisation participe au processus de la gestion de la face dans l'interaction, par exemple, mais aussi de la construction d'un objet de conversation commun - im(T) - sans lequel la schématisation placée au centre du schéma devriendrait multiple. Voir à ce sujet les travaux sur la construction de la *quaestio* (*issue* en anglais) dans l'argumentation (p.ex. : Greco Morasso, 2011 ; Mehmeti & Perret-Clermont, 2016).

3.3.4.2 Une logique dialectique

Grize ne présente pas son travail sur la communication comme une *théorie*[223], ce que j'ai choisi de faire après avoir lu Campos (2017)[224], qui en relève quelques implicites importants :

> *Il faut bien comprendre que même sans jamais l'avoir présenté comme une théorie de la communication, celle-ci est implicite dans la pensée de Grize notamment la conceptualisation des mécanismes de schématisation. La communication pour lui est un processus progressif. En effet, sa pensée nous mène à redéfinir le sens même de "théorisation des systèmes ouverts" afin de le réorienter envers une circularité spirale progressive. Piaget avait conçu cette idée d'une circularité spirale comme représentative de la progression scientifique humaine tandis que Grize l'amplifie traitant aussi tout type de savoir.*
>
> *(Campos, 2017, p. 166 du manuscrit)*

Avant de poursuivre, j'attire l'attention sur l'usage du terme "savoir" par Campos dans "traitant aussi tout type de savoirs" : Campos et Grize utilisent les termes "savoir" et "connaissance"dans un rapport inverse à celui des didactiques disciplinaires francophones, qui s'est désormais généralisé en sciences de l'éducation et que j'ai adopté pour cette recherche (voir à ce sujet les définitions discutées à la section 2.3.2.2, p. 78 et suivantes, et le glossaire à l'annexe A, p. 793 et suivantes). Pour Piaget, les *savoirs* sont ceux des personnes, et s'ils peuvent être justifiés ce sont néanmoins des approximations reliées au vécu subjectif, tandis que les *connaissances* ont une valeur de vérité universelle - souvent implicitement considérée comme positive - et constituent ce que l'ensemble d'une culture est parvenu à établir comme croyances au sujet du monde. Selon cette acception des termes, *connaissances* et *connaissances scientifiques* sont presque synonymes.

Grize reprend cet usage piagétien, et le spécifie en fonction de ce que nous avons nommés ses *éléments d'épistémologie* :

> *Grize nous amène à considérer le "savoir" comme expression des contenus des schématisations en situation et la connaissance comme expression des calculs formels des modélisations qui résultent de procédés axiomatisés.*
>
> *(Campos, 2017, p. 359 du manuscrit)*

Pour adapter cet extrait à l'usage actuel des termes, il suffit d'inverser savoir et connaissance dans la citation ci-dessus, ce qui produit le texte suivant :

> *Grize nous amène à considérer [les connaissances] comme expression des contenus des schématisations en situation et [le savoir] comme expression des calculs formels des modélisations qui résultent de procédés axiomatisés.*

223. Au sens que Grize donne à ce terme.
224. J'ai eu la chance de lire ce texte dans une version française, que Grize m'a remise. Les citations font référence à ce manuscrit non publié.

(Campos, 2017, p. 359 du manuscrit)

Campos souligne de cette manière que la théorie de Grize permet de faire le lien entre *savoirs* et *connaissances*[225], par exemple entre *savoirs à enseigner* en physique et *connaissances* acquises par les élèves lors de la séquence étudiée, ce qui est particulièrement utile aux objectifs de cette recherche.

La remarque de Campos dans l'extrait cité ci-dessus au sujet de la représentation en "circularité spirale" que Grize étant à "tout type de savoir" (entendre : "tout type de [connaissance]") mérite un bref détour sur les fondements logiques de la théorisation de Grize.

Pour Piaget, le *modèle* de la circularité spirale progressive (représenté dans la figure 3.4 ci-dessous) représente la construction de *la connaissance*[226], et permet notamment de mettre en évidence les points suivants :

— la construction de *la connaissance* est un *processus* continu qui se déroule dans le temps, représenté par la ligne continue formant la spirale ;

— ce processus n'est cependant pas linéaire mais circulaire, au sens où il comprend des mouvements en aller-retour entre la *logique du sujet* et la *logique de l'objet*, dont la structure minimale est la boucle rétro-active que réalise l'action humaine dans son interaction avec le monde ;

— *la connaissance* se manifeste successivement dans des états diamétralement opposés dans le cercle sujet-objet dessiné par la spirale, états qui apparaissent en contradiction à un moment donné du processus de construction (par un exemple à un moment de conflit (socio-)cognitif), de telle sorte que la spirale représente également une logique *dialectique*[227] qui met la pensée en mouvement dans le but d'un *dépassement* de ces contradictions ;

— vu de profil, le processus continu de construction de *la connaissance* peut être découpé en "paliers" ou "étages" - formant un *disque* dans le modèle géométrique - que Piaget nomme "stades", et qui servent l'analyse de l'*ordre* du processus de construction de *la connaissance*, sans remettre en question son caractère *continu*, ces "paliers" étant délimités par le regard *de profil* que porte le chercheur sur le processus.

Ce modèle de Piaget, basé sur la métaphore géométrique de la spirale, paraît à Grize également adéquat à la représentation du processus de constructions des connaissances[228] des sujets singuliers. Il étend l'usage de ce modèle de la spirale également aux processus de schématisation en tant que processus

225. Ce lien rend également possible le passage entre les échelons étudiés par l'épistémologie génétique, à un haut niveau d'abstraction, et ceux étudiés par la psychologie génétique de l'apprentissage, en tant que science du singulier.
226. "La connaissance" est utilisé au sens piagétien ici, c'est-à-dire au sens générique de "connaissance humaine", voire de "possibilité de la connaissance humaine", qui fait l'objet d'étude de l'épistémologie génétique.
227. Au sens du *matérialisme dialectique*, comme le souligne Garcia dans la préface de Piaget (1980), et dont Jalley (2006) montre l'importance dans la psychologie de Wallon et Piaget, et dans l'épistémologie génétique. La discussion sur les multiples formes du matérialisme dialectique et de son héritage pour les sciences humaines poursuit son cours (pour les liens entre *dialogisme* et *dialectique*, voir p.ex. : Dafermos, 2018).
228. C'est-à-dire que les puces explicatives du modèle ci-dessus peuvent être relues, selon cette lecture, en remplaçant partout *la connaissance* par *les connaissances*, passant de l'épistémologie génétique à la psychologie de l'apprentissage.

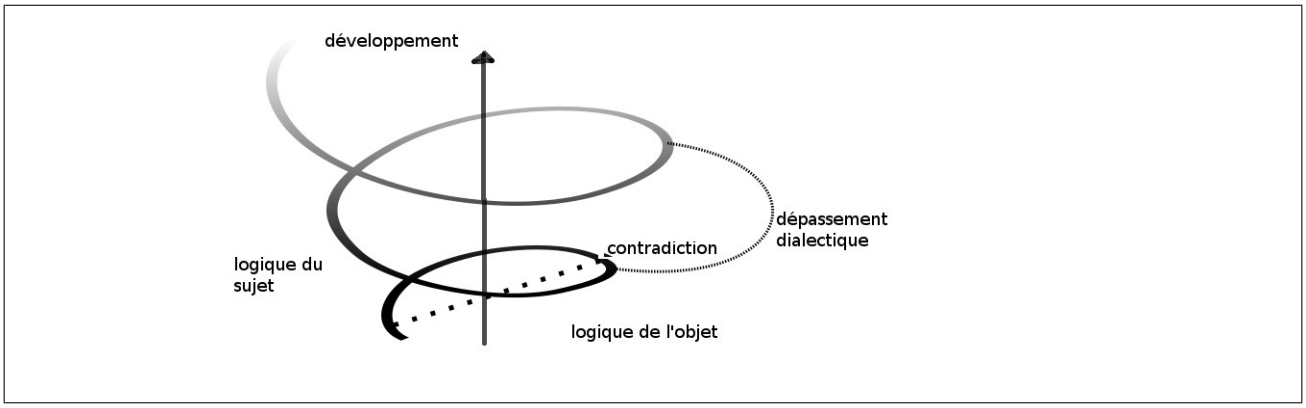


FIGURE 3.4 – Schéma de la progression en spirale (ou plus précisément en *hélice conique*).

de co-construction des connaissances individuelles à travers la communication. Ainsi, vue depuis la logique naturelle, cette représentation permet notamment de distinguer le *processus* (aspect dynamique) et l'*état* temporaire (aspect statique) des schématisations. Dans notre recherche, les connaissances des élèves au sujet de la mécanique newtonienne pourra dès lors être abordé, grâce à ce modèle, tantôt comme un processus de progression des connaissances des élèves - une *continuité* dont les ruptures attireront notre attention pour identifier des situations de malentendu - et tantôt comme (une série) d'états momentanés du processus de co-construction d'une schématisation, permettant au chercheur de disposer de traces "fixées" pour reconstruire le *processus* d'apprentissage à partir d'une observation empirique d'*états*.

L'usage de la *logique dialectique* dans la logique naturelle est importante pour comprendre l'approche de Grize, car c'est une logique de l'action : Grize s'intéresse aux processus de construction des connaissances tels qu'ils s'effectuent dans le discours, au fil des actions des interlocuteurs. Cela fait de la logique naturelle un *système ouvert*, comme nous l'avons vu, et a pour conséquence qu'on n'y fait pas de calcul, ni même de prédictions, et que le contenu est toujours présent. Il s'agit en effet d'une logique concrète, qui ne permet pas en fin d'exposition de se débarrasser du contenu pour ne raisonner que sur la forme, ou les formes, dégagées par l'analyse. Cela signifie que les opérations de pensée que nous allons présenter ne sont toujours que des opérations particulières appliquées à un contenu particulier dans un situation donnée, et il ne nous sera pas possible de proposer des résultats abstraits du contexte qui n'en retiendrait, par exemple, que les formes. Une démarche méthodologique consistant à compter le nombre d'opérations γ n'aurait aucun sens. Une opération donnée prend son sens en tant qu'elle s'applique à un contenu : les deux aspects de la forme et du contenu sont inséparables l'un de l'autre. En fait, si on y regarde de plus près, forme et contenu ne sont pas seulement inséparables, ils sont imbriqués dans une dialectique, c'est-à-dire dans une relation d'opposition qui détermine un développement au fil du temps, et pourrait être prise pour objet d'étude.

Une des conséquences concrètes du caractère dialectique et ouvert de cette logique a trait à la question du *vrai* et du *faux* : il ne s'agit pas d'une logique des *valeurs de vérité*, mais d'une logique de l'action. Autrement dit, cette logique ne vise pas à discuter des *valeurs de vérité* de *propositions* : le *vrai* et le *faux* sont remplacés dans cette perspective par un contenu au sens plein du terme, sans le réduire à la

question de son éventuelle *véracité*. Cette particularité de la logique naturelle la rend utile pour aborder les processus d'apprentissage : le chercheur peut décrire une logique discursive et cognitive de transformation de contenus, mettant en relation *savoirs enseignés* et *connaissances* acquises par les élèves, au lieu de n'aborder l'apprentissage qu'en termes de *vrai* ou *faux*, ce qui finit souvent par s'opérationnaliser sous la forme d'une évaluation des conceptions des élèves comme *vraies* ou *fausses*, alors que ce jugement du chercheur est inextricablement lié à la comparaison de ces conceptions avec un savoir expert, qui demeure dans ce cas hors du champ d'observation et d'analyse de la recherche.

La référence de Grize à la *logique dialectique* est parfois explicite : il se réfère par exemple à un ouvrage de Lefebvre (1969) :

> *En effet, ainsi que H. Lefebvre l'écrit :Le contenu étant fait d'éléments opposés - comme l'objet et le sujet - l'examen de telles interactions se nomme par définition* dialectique*, et la logique concrète ou logique du contenu sera la* logique dialectique *[1916 : 52].*
>
> *(Grize, 1987, p. 47)*

Il est plus aisé de comprendre le passage cité par Grize si l'on retourne au texte de Lefebvre. Voici les phrases qui précèdent le passage cité :

> *La logique formelle, logique de la forme, est donc la logique de l'abstraction. Lorsque notre pensée, après cette réduction provisoire du contenu, revient vers lui pour le ressaisir, la logique formelle s'avère insuffisante. Il faut lui substituer une logique concrète, une logique du contenu, dont la logique formelle n'est qu'un élément, une ébauche valable sur son plan formel, mais approximative et incomplète.*
>
> *(Lefebvre, 1969, p. 52)*

D'après ce passage, il apparaît clairement que l'idée n'est pas d'opposer forme et contenu, ou logique formelle et logique du contenu, comme deux options intellectuelles mutuellement exclusives - et d'ailleurs Grize ne le fait pas. Au contraire, la forme fait partie du contenu, et dans une logique dialectique une relation dialectique s'établit entre forme et contenu. Grize, toujours dans le même article, parle de la relation dialectique entre logique formelle et logique du contenu au cours de l'histoire récente de la logique :

> *Il m'est arrivé à plus d'une reprise, dans certaines publications, d'opposer langues naturelles et langages formels comme deux pôles, donc comme extérieurs l'un à l'autre. La brève description précédente suffit à faire voir qu'il s'agissait là d'une erreur, à tout le moins d'une maladresse. Certes, il y a bien opposition. Les langues ont des sujets énonciateurs, elles font usage d'objets toujours plus ou moins flous, elles se servent de règles tacites. Par contraste, les langages logico-mathématiques ne connaissent pas de sujet énonciateur, travaillent sur des objets dont les propriétés sont univoquement déterminées et fixées et ils explicitent toutes les règles admissibles. A y regarder de plus près, cependant, on s'aperçoit que l'on a affaire à un processus dialectique, de la nature de ce que D. Hofstadter appelle Boucles Etranges [1985]. Il faut bien voir, en effet, que le point de départ*

> *se trouve nécessairement dans la logique naturelle et spontanée. Diverses difficultés (sophismes, paradoxes, antinomies même) ont conduit à raisonner sur les raisonnements eux-mêmes et à des formalisations de plus en plus complètes. Mais, enfin parvenu aux systèmes formels au sens strict, on s'est aperçu à travers le théorème de Gödel et ceux de quelques autres [GRIZE 1982 : 67-89] que l'on était nécessairement renvoyé à la langue et à la logique naturelle.*
>
> *(Grize, 1987, pp. 44-45)*

Autrement dit, le cadre conceptuel de la théorie de la connaissance de Grize s'applique - évidemment aurais-je envie de dire - également à sa propre théorisation, et au problème du rapport entre logique formelle et logique naturelle, qui entretiennent des rapports en "boucles étranges" (*ibidem*) qui font écho aux boucles rétro-actives permettant de rendre compte du développement de la connaissances humaines. La boucle est bouclée, si je puis me permettre ce jeu de mots tout à fait sérieux, encore que je n'aborderai pas ici cette question épistémologique complexe concernant le rapport entre logique formelle et logique naturelle. Je me contente de montrer l'intérêt de cette théorie pour ma recherche, et son extraordinaire réflexivité, qui permet d'en faire usage à la fois dans le travail empirique pour étudier l'apprentissage des sciences, et comme dans le travail de théorisation pour clarifier ma propre construction théorique d'une perspective à même de répondre aux questions que je me pose.

Il me reste à faire la présentation détaillées des outils de la logique naturelle. Pour commencer, je vais donner quelques précisions sur le concept de *schématisation*.

3.3.4.3 Schématisation

Intéressons-nous à présent à la *schématisation*, qui est le concept central de la logique naturelle. Il existe de nombreux passages qui traitent de la *schématisation*, que j'invite le lecteur à découvrir si la définition donnée ici lui paraît trop brève. J'ai choisi de reproduire une définition que Grize donne lorsqu'il présente son schéma de la communication :

> *Le terme lui-même [de schématisation], comme toute nominalisation, renvoie à la fois à un processus et à son résultat. Le processus est celui de la sémiose, c'est-à-dire la création de sens, "la création ininterrompue de nouvelles significations par réorganisations successives de forme de référence" (Atlan, 1985, p. 131), soit, dans la terminologie que j'ai adoptée, la création continue de sens à partir de la signification des termes utilisés. On est alors en présence d'un double mouvement : un terme particulier ne prend sens qu'au sein de la schématisation à laquelle il appartient et, en même temps, la schématisation ne fait sens que par ceux des termes qu'elle contient. Le résultat, lui, est une représentation, ce que l'allemand appelle une* Vorstellung*, c'est-à-dire quelque chose qui est placé devant le destinataire, un spectacle qui lui est donné à voir, dans l'espoir qu'il le regarde. On peut dire d'une schématisation ce qu'Edgar Morin disait d'une* représentation perceptive*, que c'est "une synthèse cognitive dotée de qualités de globalité, de cohérence, de consistance et de stabilité" (Morin, 1986, p. 106).*
>
> *(Grize, 1996, p. 69)*

Cet extrait met en évidence la qualité d'*ensemble* que constitue une schématisation : son analyse, dès lors, devra se faire prudemment, en prenant toujours en considération la globalité par des aller-retour entre les parties et le tout. La schématisation peut donc être abordée sous deux aspects : l'un statique, consiste à s'intéresser à une schématisation après coup, comme le résultat d'une activité de création de sens, momentanément cristallisée sous la forme d'un ensemble fini dont on peut analyser les tenants et aboutissants en le situant dans son contexte d'interlocution ; l'autre, dynamique, consiste à s'intéresser au processus de schématisation [229], ce qui permet d'analyser les opérations qui sont mises en œuvre au cours de ce processus. En fait, la logique naturelle s'intéresse avant tout à la schématisation en tant que processus, puisqu'elle propose "l'étude des opérations de pensée qui sont en œuvre dans l'élaboration d'une schématisation" (Grize, 1982, p. 191), mais comme nous le verrons les travaux empiriques se sont quasi exclusivement centrés sur l'analyse de schématisations en tant que produits, résultats d'une construction discursive.

Une schématisation a les caractéristiques suivantes :

1. Elle a pour fonction de faire voir quelque chose, de présenter un contenu de la pensée (au sens très large du mot) pouvoir présenter tout à la fois des aspects émotionnels, affectifs, évaluatifs, moraux, factuels, explicatifs, etc.

2. Elle a une finalité pour son auteur : une schématisation n'est jamais neutre, au sens où pour la produire l'auteur doit procéder à des choix. Ces choix se font selon la finalité de l'auteur et selon l'image qu'il/elle se fait de son auditeur ou auditoire.

3. Elle est orientée vers un auditeur ou un auditoire, dont l'auteur se fait une image.

4. Elle se réfère constamment à une situation d'interlocution "avec ses partenaires, les relations qui existent entre eux et les conditions de la communication" (Grize, 1996, p. 50).

5. Elle se réfère constamment à des préconstruits culturels, qu'ils soient de l'ordre de l'imagination ou de la fiction, ou qu'ils renvoient à un état du monde, témoignent de perceptions sensorielles, etc.

6. Elle est ouverte, c'est-à-dire qu'elle peut toujours être reprise et complétée, voire modifiée. Une schématisation n'est donc jamais achevée une fois pour toutes.

Une schématisation vise la satisfaction de trois conditions quand elle est communiquée : sa *réception* par l'auditeur ou auditoire, son *acceptation* et l'éventuelle *adhésion* de cet auditeur à la schématisation (pour les deux premières conditions, voir : Grize, 1982, p. 30 ; et pour la présentation des trois, voir : Grize, 1996, pp. 73-76). Voici une brève explication de ces conditions :

Réception : comme une schématisation n'est que présentée, construite devant un auditeur ou auditoire, et non pas transmise, cet auditeur ou auditoire doit être en mesure de reconstruire la schématisation,

229. Pour des raisons de clarté, quand j'utiliserai le terme de *schématisation* dans les analyses, je préciserai *processus de schématisation* pour désigner le processus.

c'est-à-dire de la recevoir, ce qui exige minimalement une langue commune et des compétences appropriées.

Acceptation : du fait que l'auditeur (ou l'auditoire) est potentiellement auteur de schématisations, il est à même de produire un contre-discours à celui qui lui est proposé, ne serait-ce que de manière privée et muette, et par conséquent de ne pas accepter la schématisation, et peut-être de la transformer alors même qu'il la reçoit [230].

Adhésion : même acceptée, une schématisation ne suscite pas forcément l'adhésion, qui prend en considération "le désir, l'affectif, l'émotif, le cupitum", et est de l'ordre du persuader alors que l'acceptation n'est que de l'ordre du convaincre.

Ces trois conditions relèvent d'un niveau d'analyse de la communication qui traite de l'influence entre les interlocuteurs : ce niveau nous concerne dans l'étude des situations de malentendu. Plus particulier, les deux remarques suivantes peuvent contribuer à définir ces *situations de malentendu* :

— la question des compétences et de la maîtrise de la langue utilisée soulevée par la condition de *réception* d'une schématisation adresse effectivement le malentendu par l'une de ses sources - les compétences de l'interlocuteur à reconstruire la schématisation - que je discuterai de manière plus détaillées en examinant la sémiologie de Grize à la section suivante ;

— certains malentendus apparaissent comme tels mais, de fait, ne font que couvrir ou cacher un *contre-discours*, c'est-à-dire la non-*acceptation* de la schématisation par l'interlocuteur.

Le deuxième cas ci-dessus est intéressant pour cette recherche, car il est bien connu de l'enseignant dans sa pratique : un élève qui n'est pas d'accord avec ce que l'enseignant présente, ou en désaccord sur la tâche à effectuer, dissimule son contre-discours par une énonciation du genre de "je ne comprends pas", au lieu d'énoncer une objection explicite et directe avec le discours de l'enseignant. Il me paraît pourtant peu pertinent de considérer une situation de ce genre comme une *situation de malentendu*. Ce problème attire mon attention sur la nécessité, au moment de définir les *situations de malentendu*, de les distinguer d'éventuelles *situations de désaccord*, que le *contre-discours* soit explicite ou implicite.

Ces quelques réflexions sur la dimension stratégique de la communication, qu'il convient de distinguer du processus de schématisation lui-même :

> *C'est pourquoi il convient de distinguer des* processus *et des* stratégies *dans l'activité schématisante. Un processus est le mouvement même par lequel la pensée verbale, en interaction avec son environnement, produite des significations à partir de celles qu'elle rencontre, les identifie, les assimile, les déplace - se les approprie consciemment ou non. Une stratégie est une organisation opérationnelle dans laquelle un agent coordonne des moyens à des fins conscientes ; l'action stratégique n'est pas seulement consciente de ses buts, elle l'est aussi d'elle-même en tant que voie d'accès*

230. Grize donne l'exemple suivant de transformation explicite : "- Les immigrés enrichissent notre culture - Non, c'est faut, ils la détruisent" (Grize, 1996, p. 73).

à ces buts ; elle programme donc leur réalisation tout en contrôlant les procédures d'exécution qu'elle met en jeu.

Ces deux notions sont elles aussi relatives : un processus discursif peut devenir stratégique dès qu'il se transforme en méthode - cela veut dire que celui qui le développe est conscient de sa forme et qu'il pourra l'appliquer en en organisant les étapes. Il aura pu notamment abstraire, dans l'orientation globale d'une action, une finalité concertée.

(...)

Certains discours manifestent plus d'éléments stratégiques que d'autres. Cela est évident pour le discours scientifique et l'activité de recherche en général ; cela l'est aussi pour les argumentations qui mettent en jeu tout l'appareil des techniques oratoires avec des fins précises. Cela l'est moins dans ces conversations que l'on a au jour le jour, dans les discours ordinaires qui s'adaptent en quelque sorte coup par coup aux circonstances présentes.

(Borel et al., 1992, pp. 65-66)

Au moment des analyses, je resterai donc attentif à faire la distinction entre processus de schématisation, orientée vers une intercompréhension, et d'éventuels autres finalités des élèves ou de l'enseignant qui nécessiterait une analyse de l'*action stratégique* des interlocuteurs. Le cadre institutionnel du milieu scolaire, orienté vers l'enseignement et l'apprentissage, devrait néanmoins contribuer à minimiser l'*action stratégique* et me permettre de me concentrer sur le processus de schématisation, et le processus d'apprentissage.

Dans le présent travail de recherche, analyser le *processus de schématisation* à l'aide des opérations de la logique naturelle devrait me permettre de faire des hypothèses sur le sens que donnent les interlocuteurs au discours qu'ils produisent, alors que les schématisations observées comme des produits permettront de mettre en évidence les divergences entre les interlocuteurs à un moment donné, dès que le sens de ces schématisations produites a pu être établi du point de vue du locuteur à travers l'analyse du processus. En procédant de la sorte, le concept de schématisation et la spécification des opérations logico-discursives me donnent les moyens de faire des liens entre les activités de sémiose des élèves, indices de leurs connaissances, et les savoirs que l'enseignant exprime dans ses discours. Dans ce but, la prochaine section permet d'aborder la sémiologie que Grize construit avec une conception du signe et l'ensemble des opérations logico-discursives.

3.3.5 Une sémiologie

J'ai intitulé cette section "une sémiologie", dans le but de rendre compte d'une distinction entre *sémiologie* et *sémiotique* qui permet de préciser la contribution de Grize dans ce domaine. La *sémiologie* est définie par Ferdinand de Saussure dans *Cours de linguistique générale* comme "la science qui étudie la vie des signes au sein de la vie sociale" alors que le nom *sémiotique*[231] est plutôt utilisé par Peirce pour son approche de "la théorie quasi nécessaire ou formelle des signes" [232]. Autrement dit, la sémiologie s'intéresse

231. L'usage de "sémotique" comme adjectif n'est évidemment pas restreint à l'usage de *sémiotique* auquel je me réfère ici, en tant que nom pour désigner une discipline de la connaissance.

232. Ces définitions sont citées par Wikipédia, l'encyclopédie en ligne, consultée le 13 janvier 2020 sur https ://fr.wikipedia.org/wiki/Sémiologie.

moins spécifiquement au signe lui-même qu'à ses usages dans la vie sociale, dans une posture interdisciplinaire[233] ou au moins transdisciplinaire. C'est précisément ce que permet l'œuvre de Grize, comme je tente de l'argumenter ici. Je considère les travaux du *Centre de recherche sémiologiques* suffisamment aboutis[234] pour pouvoir présenter ici, très brièvement, *la sémiologie de Neuchâtel*[235].

3.3.5.1 Une théorie du signe

Dans son ouvrage, Grize (1996) précise que sa conception du signe n'ambitionne pas d'être une théorie supplémentaire dans le débat philosophique, et qu'il s'est permis des emprunts à divers auteurs et théories existantes (de Saussure, Peirce, etc.) "en toute liberté" (Grize, 1996, p. 40). Pourtant, emprunts et usages des concepts saussuriens, de Peirce et de Umberto Eco sont effectués soigneusement, dans l'objectif précis de donner des fondements à la logique naturelle qui permettent d'en faire un usage interdisciplinaire. Or, une *sémiologie* a justement pour fonction de permettre l'étude de l'usage des signes à l'interface de toutes les sciences humaines, à travers les disciplines académiques traditionnelles, pour permettre d'aborder la question de l'usage des signes *dans la vie sociale*. Il me semble ainsi que Grize, par sa démarche, ne fait pas *moins* que d'ajouter une théorie supplémentaire dans le débat philosophique, il fait *davantage* : en proposant une théorie plus réduite et plus modeste, celle-ci permet la coordination de plusieurs disciplines, et surtout l'observation des phénomènes relatifs à l'usage des signes et à la communication entre plusieurs échelons d'observation[236]. Or, cette coordination entre les phénomènes et leur étude à des échelons différents constitue justement le problème scientifique redoutable sur lequel l'étude des processus d'apprentissage se heurte.

Examinons à présent le modèle du *signe*[237] que propose Grize (1996), et dont j'ai reproduit le schéma à la figure 3.5 (ci-dessous).

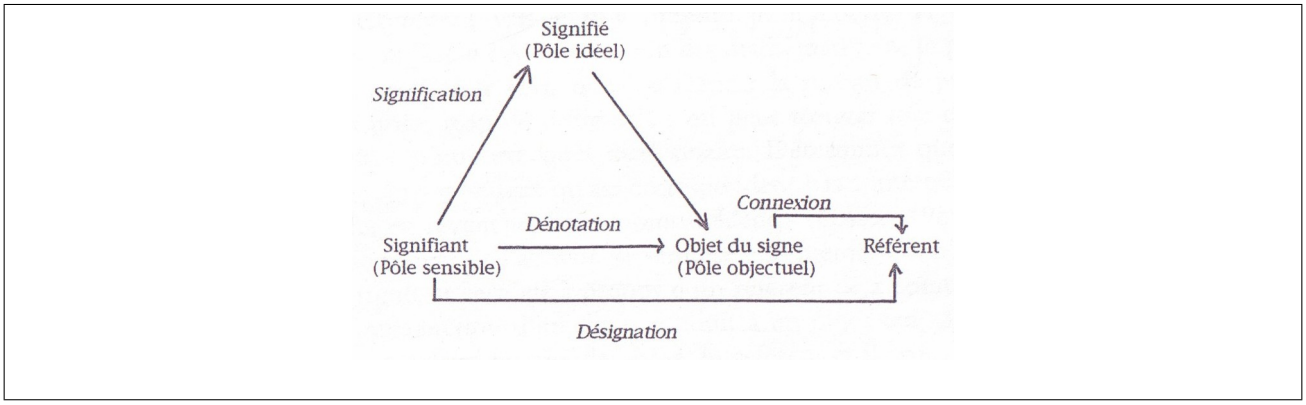


FIGURE 3.5 – Schéma du modèle du signe de Grize (1996, p. 42).

233. On pourrait imaginer la psychologie sociale des signes, la sociologie des signes, etc.
234. Cette remarque un peu étrange de ma part se justifie par l'absence de reconnaissance similaire dans le monde académique, Grize lui-même allant jusqu'à nommer sa théorie "une conception naïve du signe" (Grize, 1996, p. 42), par excès de modestie.
235. En effet, pendant les quelques 40 ans d'existence de ce Centre de recherche à l'Université de Neuchâtel ,de nombreuses et nombreux auteurs ont participé aux publications dans les *Travaux du centre de recherches sémiologique*, de 1969 à 2010.
236. Les théories plus sophistiquées ou pointues, comme celle(s) de Peirce, sont plus difficiles à mobiliser dans ce but, à mon avis.
237. Le terme *signe* est utilisé dans un sens qui se distingue de celui que lui donnait Piaget : Grize nomme *signe* ce que Piaget appelait *symbole*, et vice-versa.

Dans ce schéma apparaît une vue d'ensemble des composants du *signe*, et de leur relations respectives :

Le signifiant est l'aspect sensible, perceptible, du *signe*, que ce soit un graphisme, un panneau de circulation, une illustration ou autre chose. Il peut notamment être totalement arbitraire (un *symbole*), ou emprunter quelque chose de son référent par métonymie (un *indice*) ou par métaphore (une *icône*). Grize propose de noter le *signifiant* entre barres obliques, comme ceci : /soleil/.

Le signifié [238] est l'aspect idéel du signe, l'idée associée au signifiant *pour quelqu'un* ou *pour une communauté*, de manière que "le signifié d'un nom peut être assimilé à la définition de ce qu'il désigne" (Rey-Debove, 1978, p. 94, cité par Grize, 1996, p. 41). Grize propose de noter le signifié entre guillemets, p.ex. "l'étoile du Système solaire, une étoile de type naine jaune, composée d'hydrogène et d'hélium" [239].

L'objet du signe est l'aspect objectuel du *signe*, l'objet associé au signifiant, ou l'objet créé dans le discours (objet immédiat dans la théorie de Peirce) par l'usage du *signe* ; par exemple, le signifiant /Jean/ a un signifié univoque qui est "la personne dont le prénom est Jean", partagé par la communauté, mais peut avoir différents objets selon la situation d'interlocution : ce peut être Jean Piaget, Jean Reno, ou quelque autre Jean dont on parle en ce moment. Ainsi, la décision de Grize de distinguer entre *signifié* et *objet du signe* permet de faire la différence, notamment, entre une définition conventionnelle et culturelle d'un *signifiant* comme celle que l'on trouve dans un dictionnaire (le *signifié*), et le sens que prend singulièrement le même *signifiant* dans une situation d'interlocution particulière (l'*objet du signe*). Cette distinction me sera très utile pour analyser les situations de malentendu, et permet également de préciser le statut épistémique des hypothèses que je peux faire à l'aide de la logique naturelle quant au sens que les élèves donnent aux signes qu'ils utilisent et rencontrent en classe : la *classe-objet* de la logique naturelle est une reconstruction de l'*objet du signe* de Peirce, dans la sémiotique de Grize. Je ne reprendrai pas la proposition de Grize de noter l'objet du signe en italique, car je fais un abondant usage de l'italique, notamment pour spécifier mon usage technique de la langue et attirer l'attention sur le statut de *concept* de certains termes. Par contre, comme la *classe-objet* est l'outil proposé par la logique naturelle pour définir les *objets du signe*, ces objets seront mis en accolades comme le veut l'usage de la logique naturelle pour les *classes-objets*, par exemple : {le beau soleil d'aujourd'hui}.

Le référent est l'objet extérieur au signe, il est objet réel (objet dynamique dans la théorie de Peirce) mais pas forcément concret, par exemple le référent de /liberté/ est plutôt ce que Umberto Eco appelle une *unité culturelle*. Pour reprendre notre exemple de Jean ci-dessus, le référent de /jean/ est, selon la situation d'interlocution, la *personne* de Jean Piaget ou de Jean Reno ou encore d'un autre Jean, selon les circonstances. Pour désigner le référent lui-même, la logique naturelle le conceptualise comme une notion primitive, qui est notée entre des barres verticales, p.ex. |rayons de soleil traversant ma fenêtre|.

238. Grize reprend ici le terme saussurien plutôt que celui de Peirce ("interpretant"), cependant il en change quelque peu la définition puisqu'il ajoute au concept de nouvelles relations, avec un *objet du signe* et un *référent*.
239. Selon la définition de wikipédia, l'encyclopédie en ligne, consultée le 14 janvier 2020 sur https ://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil).

La relation de signification relie le *signifiant* au *signifié*.

La relation de dénotation relie le *signifiant* à *l'objet du signe*.

La relation de désignation relie le *signifiant* au *référent*.

La relation de connexion relie *l'objet du signe* au *référent*.

La connotation est un enrichissement de la relation de *signification* par le *référent*, du fait que celui-ci, en tant qu'objet extérieur au discours, est associé à des expériences vécues - vécues personnellement ou par témoignage au sein d'une culture donnée - qui ont un effet en feed-back au moment où il est *désigné* : elle colore la *signification* du *signifiant*. Par exemple, le signifiant /race/ a pris une connotation négative suite aux nombreuses atrocités et maltraitances qu'ont perpétrés des êtres humains *au cours de l'histoire* : cette connotation provient d'une réalité concrète (un *référent*), culturellement reconnue, et ne se trouve nulle part dans la définition du terme linguistique lui-même. En ce sens, la connotation n'est pas une *relation* mais une *interaction entre le référent et une relation*.

La *signification* d'un mot est ce qui correspond à son sens littéral, et Grize réserve le concept de *sens* (d'un mot, d'un discours) pour l'usage qui en est fait, c'est-à-dire pour le résultat de l'activité discursive. Le sens est donc extérieur au signe proprement dit, et le contient tout en entretenant des relations avec la situation d'interlocution dans son ensemble, et de nombreux éléments extérieurs au signe, comme la ou les finalité(s) de la communication, les images, etc.

À examiner le schéma reproduit dans la figure 3.5 (p. 194), on s'aperçoit que la relation entre *signifié* et *objet du signe* n'est pas nommée par Grize, ni d'ailleurs discutée dans le texte. Afin d'éviter au lecteur de penser qu'il s'agit d'une lacune, je vais tenter d'en dire quelques mots à partir de texte de Grize. Dans son explication justifiant l'introduction de *l'objet du signe*, qui n'existe pas dans la théorie de Saussure, Grize donne deux exemples en mathématique dont il ressort que *l'objet du signe* peut être identique (p.ex. pour une "droite") ou différent du *signifié*, et qu'à un même *signifié* peut correspondre plusieurs *objets* : par exemple le signifiant $/\sqrt{16}/$, où le *signifié* "nombre qui multiplié par lui-même donne 16" a deux *objets de discours* : l'objet *+4* et l'objet *-4*. Je propose de baptiser cette relation entre le *signifié* et *l'objet du signe* comme une relation de *singularisation* : le *signifié* prend des formes singulières dans un *objet de discours* utilisé à l'occasion d'une communication particulière, ou interprété d'un certain point de vue, lui-même situé dans le temps, le milieu socio-culturel, etc. Ainsi, l'*objet de discours* peut être considéré plus ou moins éloigné du *signifié* reconnu, voire identique dans un cas extrême comme dans l'exemple de Grize en mathématique. Pour autant que je le comprends, la relation entre le *signifié* et l'*objet du signe* a quelque chose d'une relation de singularisation, l'objet étant un cas particulier du signifié plus général, et aussi une appropriation personnelle par le ou les locuteurs du langage, défini au niveau des préconstruits culturels, plus collectifs.

Avant de discuter du modèle et de proposer un nouveau schéma qui prend en compte la discussion ci-dessus, j'aimerais faire encore quelques remarques. Si la relation entre le *signifiant* et le *référent*, la *dénotation*, est surtout une relation d'adressage qui permet d'identifier un référent à partir d'un signifiant,

c'est-à-dire qu'elle a surtout pour fonction de permettre une *attention conjointe* entre les interlocuteurs, il n'en est pas de même pour la *connexion* qui relie l'*objet du signe*, au *référent*. En effet, cette *connexion*, nous dit Grize, est telle que l'*objet du signe* ne retient toujours que quelques aspects de son référent. Il écrit :

> *On n'introduit jamais un signe, si ce n'est à propos d'un référent déjà connu par ailleurs, et l'introduction d'un signe conduit à un objet qui, d'une certaine façon, n'éclaire qu'une des faces du référent et il arrive souvent, comme en mathématiques, qu'il s'agisse d'une face, sinon totalement cachée du moins peu visible.*
>
> *(Grize, 1996, p. 44)*

Le terme "éclaire" utilisé dans cet extrait n'est pas choisi à la légère, dans un usage poétique. En effet, dans de nombreuses publications (Grize, 1990, p. ex.), Grize parle du phénomène d'*éclairage*. En conséquence, je propose d'introduire ce concept d'*éclairage* dans le modèle du signe et de le placer précisément comme une spécificité de la relation de *connexion*, quand elle va de l'*objet de discours* au *référent*.

De plus, le passage de Grize reproduit ci-dessous m'invite à placer dans le modèle une nouvelle relation, allant du *référent* à l'*objet du signe*, que j'appellerai une relation de schématisation puisqu'elle procède du processus de *schématisation* par un locuteur construisant son discours à partir de ses représentations sur le *référent*.

> *Je ferai voir plus loin que les activités discursives, les activités de schématisation, ont tout justement pour propos de construire des objets à partir des référents qui sont l'occasion des discours tenus.*
>
> *(Grize, 1996, p. 43)*

Nous avons donc, pour la même relation de *connexion*, dans un sens le processus d'*éclairage*, et dans le sens inverse, en partant du référent pour construire un objet du signe, le processus de schématisation [240]. L'éclairage et la schématisation entretiennent un rapport dialectique au sein de la relation de connexion - elles sont comme les deux faces d'une même pièce - : les choix de filtrage et de saillance effectués lors du processus de schématisation ont pour conséquence que celle-ci *éclaire* certains aspects du *référent* plutôt que d'autres avec les *objets de discours* contruits. Il s'ensuit une conséquence importante pour cette recherche, à savoir que relativement au même discours, ce qui est l'*objet du discours* (l'objet immédiat) pour le locuteur peut, par exemple, être le *référent* (l'objet dynamique) pour l'auditeur. Grize signale ce problème, particulièrement important en milieu scolaire, et prenant précisément l'exemple des élèves :

> *Lorsque le professeur présente par exemple à ses élèves un modèle d'un phénomène physique, pour lui le phénomène est l'objet dynamique [l'*objet du signe*, N.d.A.] et le modèle le phénomène im-*

240. Dans une communication donnée, tous les objets utilisés ne sont pas construit à partir du référent dans ce sens-là, mais servent d'*ancrage* pour construire l'objet de discours, par exemple les classes-objets utilisées.

> *médiat [le* référent*, N.d.A.]. Mais pour l'élève, c'est le modèle qui est objet dynamique [l'*objet du signe*, N.d.A.] et ce qu'il en saisit l'objet immédiat [le* référent*, N.d.A.].*
>
> *(Grize, 1996, p. 38)*

Ce problème montre que la distinction entre *objet du signe* et *référent* dépend du point de vue de l'interlocuteur : à partir d'une même schématisation, l'un peut n'y voir qu'un *objet du signe* sans connexion avec un *référent*, alors que pour l'autre, un référent est désigné par le même signifiant. C'est particulièrement important pour une recherche sur les situations de malentendu, car il y a de fortes probabilités que je rencontre ce genre de phénomène au cours de mes analyses. L'intérêt de la sémiologie de Grize, est précisément de pouvoir distinguer, grâce aux quatre composants du signe et des relations qu'ils entretiennent, ce qui fonctionne comme *signifiant*, comme *signifié*, comme *objet du signe* et comme *référent* selon les points de vue. Avec cette outillage, les analyses devraient permettre de mettre en évidence les déplacements de ces éléments selon les points de vue, que Grize signale dans l'extrait ci-dessus.

Ce problème met également en évidence le fait que ces composants du signe n'existe, *in fine*, que dans et par l'activité de pensée d'une personne, aussi située soit-elle dans son interlocution. Je reviendrai sur ce point à la section suivante (section 3.4.1, p. 222), au moment de définir *situation de malentendu*.

À ce sujet, Grize apporte quelques précisions :

> *Droit dans ses bottes, un signe n'est signe que si la pensée le renvoie à autre chose qu'à lui, c'est-à-dire un* référent*, dans le monde des choses et des idées. Ainsi le signe /café/ à boisson chaude, à graine de caféier moulue, à liquide qui contient un alcaloïde, à ce qui passera comme "Racine" (Madame de Sévigné dixit), à établissement public, etc. D'autre part n'importe quoi peut être élaboré en signe, certains esprits particulièrement anxieux voient même dans le LHC du CERN le signe de la fin du monde ! Des référents, "la fin du monde" par exemple, on peut dire aussi que ce sont des* unités culturelles*, c'est-à-dire des réalités préformées dont Pierre Vergès écrivait qu'elles sont des "lieux de détermination des représentations sociales" (Vergès, 1987). L'objet du signe est un* concept*, il est ce que dit sa définition, identique pour chacun il est immuable ; le référent est une notion, elle est entourée de connotations de toutes sortes, elle varie selon l'époque et le vécu des usagers. Toutefois au sein d'une société donnée et à un moment donné de son développement, une unité culturelle renvoie à un ensemble de représentations suffisamment partagées pour permettre au garçon de ne pas servir une bière à qui a demandé un café.*
>
> *(Grize, 2010, p. 94)*

Selon Grize, pour la personne qui fait usage d'un signe, le *référent* est de l'ordre de la *notion* - qu'il appellera une *notion primitive*[241] parce qu'elle peut être prélangagière - alors que l'*objet du signe* est de l'ordre du *concept*[242]. Je devrai faire un usage un peu souple de cette idée - d'où mon ajout ici de

241. (Grize, 1996, p. 82) emprunte la définition des *notions primitives* à Culioli : ce sont "des systèmes de représentations complexes de propriétés physico-culturelles", où l'on retrouve cette double composante perceptive et culturelle.

242. Cette manière de concevoir le référent prend au sérieux le processus interprétatif et de sélection des informations pertinentes effectué par notre cerveau avant même que nous ayons un accès conscient à nos perceptions, tout en différenciant

l'expression "de l'ordre de" - car Grize n'a pas en tête le cas de figure très particulière où l'usager du signe est, en même temps qu'il l'utilise, en train d'acquérir le concept en question, justement. Or, en étudiant le processus d'apprentissage dans et par le discours, je me trouve dans ce cas de figure très particulier. Sa remarque générale sur l'*objet du signe* étant un *concept* retient cependant toute mon attention pour ce qui est de l'élaboration de ma démarche d'analyse : comme je l'ai déjà évoqué plus haut à plusieurs reprises, c'est bien au niveau de l'*objet du signe*, c'est-à-dire des *classes-objets*, que je pourrai vraisemblablement observer quelque chose de la construction progressive des *concepts*.

En guise de synthèse de ces quelques éléments de discussion du modèle, je présente dans la figure 3.6 ci-dessous un schéma augmenté des précédentes remarques, qui me permettra d'être précis lors des descriptions des situations de malentendu.

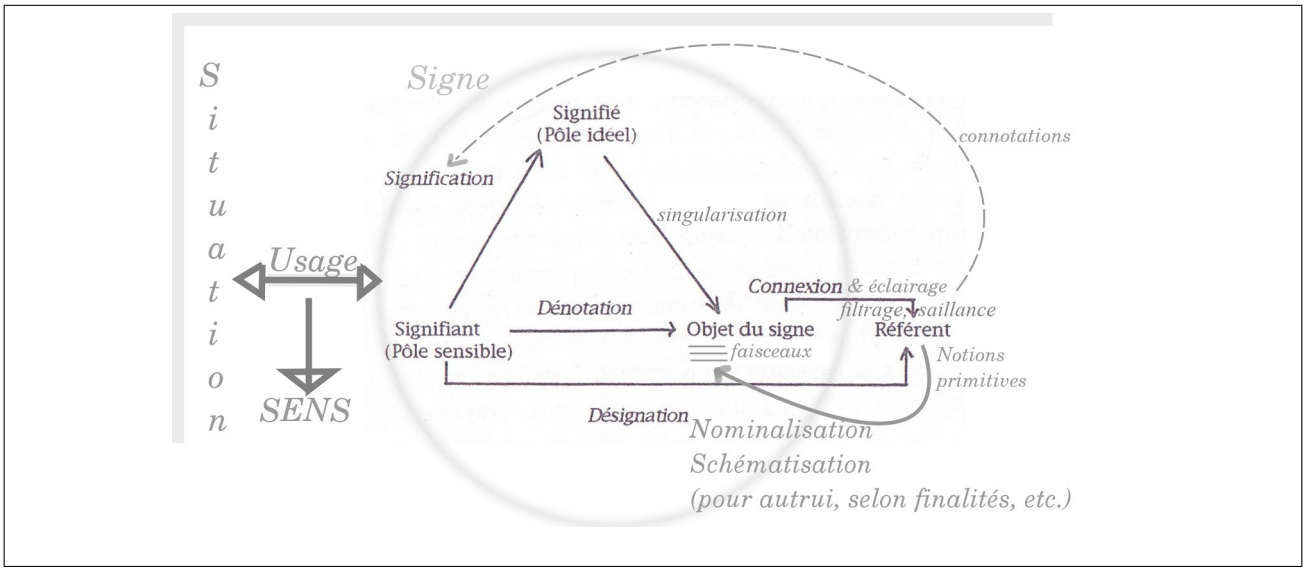


FIGURE 3.6 – Schéma augmenté du modèle du signe (adapté de Grize, 1996).

Dans le schéma de la figure 3.6 (p. 199), les ajouts par rapport au schéma original sont en gris. Les processus de *schématisation* et d'*éclairage* sont mentionnés afin de spécifier leur niveau de généralité par rapport au signe : rappelons pour l'occasion que notre unité minimale (l'échelon d'observation le plus petit) est le *mot-signification*, auquel j'ai fait correspondre la *classe-objet* de la logique naturelle et que l'on retrouve dans ce modèle comme objet du signe, c'est-à-dire l'objet créé dans un discours en relation avec un signifiant et son signifié conventionnel, et son éventuel référent. On aurait pu choisir de faire correspondre le mot-signification au sens, plus général, que prend le signe dans la situation : mais à mon avis l'analyse des diverses relations mises en évidence dans le modèle du signe de Grize permet justement la reconstruction de la singularité de cet usage, qui reste opaque si l'on ne s'intéresse pas à ces relations entre les composants du signe lui-même.

ce qui se passe à cet échelon-ci de la cognition, de ce qui se passe aux autres échelons, ce que ne fait pas la théorie du traitement de l'information en postulant un même processus - de traitement de l'information - pour tous les échelons de la perception à la communication. Autrement dit, la sémiologie de Grize permet de rendre compte du fait que la culture joue un rôle dans la perception même des objets physiques (voir p.ex. la théorie de la catégorisation de J. Bruner, résumée par Delorme, 1982). Un exemple facile peut être donné concernant les couleurs : au continuum des longueurs d'onde, la culture établit des catégories (qui varie selon les cultures) par des noms de couleurs, qui permettent une désignation de la longueur d'onde perçue (pour une argumentation plus détaillée, voir p.ex. : Giere, 2006).

Il est intéressant de remarquer que dans ce modèle, on retrouve le fonctionnement en boucle rétro-active cher à Piaget, quelque soit l'ordre par lequel on entre dans le modèle :

1. Par le processus de *schématisation*, un locuteur construit[243] un *objet du discours* à partir d'un objet réel (un *référent*), objet concret ou culturel dont il a quelque *représentation*. Comme cette *schématisation* demeure forcément partielle par rapport à l'inépuisable richesse du réel, l'*objet du discours* vient en retour porter un *éclairage* singulier et spécifique sur le *référent*, permettant de filtrer et rendre saillants certains aspects plutôt que d'autres (voir "le postulat de construction des objets", p. 183). Cet *éclairage* permet de connaître/savoir quelque chose du *référent*, pourtant cette connaissance/savoir n'est jamais neutre, puisque sa schématisation n'est jamais complète : en cela, le modèle met en scène la créativité et la limite qui se trouve au cœur du processus d'apprentissage par le discours.

2. Par les relations de *signification*, de *dénotation* en situation d'interlocution, le discours permet éventuellement aux élèves de faire la *connexion* entre un *objet de discours* et le *référent* dont ils sont censés construire quelques connaissances/savoirs, et en retour ces connaissances/savoirs leur permettent de transformer les relations de *signification* et de *dénotation*, permettant progressivement un usage plus technique, plus scientifique des *signifiants*. Lorsque l'ensemble de ces relations se stabilise, de manière à ce que les liens du mot à la chose et à son usage soient établis, on peut dire que l'élève a acquis un *concept*.

Ce schéma augmenté fait également apparaître la *situation d'interlocution*, comprenant le locuteur, ses interlocuteurs, leurs représentations, les objets matériels présents (dont l'un ou l'autre est peut-être référent), et bien d'autres choses encore, le tout ancré dans un contexte socio-historique donné, *situation d'interlocution* qui est indispensable à la compréhension de relations entre signifiant, signifié, objet du signe et référents. C'est pourquoi j'ai placé le *sens* que prend un signe comme résultant de l'*usage* de ce signe en situation, car seuls les rapports complexes entre cet usage, le signe lui-même et la situation permettent aux personnes impliquées une (re)construction de sens. Par conséquent, cette reconstruction du sens par le chercheur ne peut pas se baser uniquement sur l'analyse du discours produit : c'est en analysant la production, le processus de construction des schématisations, que le chercheur peut espérer faire des hypothèses sur le sens résultant de l'usage des signes en situation. Cette dimension génétique de la sémiologie de Grize le conduit à postuler un ensemble d'*opérations logico-discursives*. C'est la dernière partie de cette présentation de la sémiologie de Neuchâtel.

3.3.5.2 Opérations logico-discursives

Afin de présenter les opérations de la logique naturelle, nous allons nous référer à deux publications de Jean-Blaise Grize. En premier lieu, nous prendrons comme base la présentation faite à l'intention de l'utilisateur des sciences sociales (Grize, 1996), car elle constitue la présentation d'ensemble la plus détaillée.

243. En outre, lorsque cette schématisation est tout à fait minimale, au sens où elle revient à donner un nom à une chose, Grize parle parfois aussi de *normalisation* (Grize, 1989, p. 106).

Dans un deuxième temps, je citerai cependant une description en annexe d'un ouvrage plus récent (Grize & de Montmollin, 2008, pp. 63-71), qui reprend l'ensemble de ces opérations en les plaçant dans une perspective nouvelle visant la simplicité et peut-être une articulation facilitée avec les sciences du langage, à travers l'utilisation de la théorie des catégories logico-sémantiques de Tarski et Adjukewicz (Grize & de Montmollin, 2008, p. 67).

Grize (1996) fournit un schéma de synthèse de l'ensemble des objets et opérations de la logique naturelle, (reproduit sur la figure 3.7 (ci-dessous).

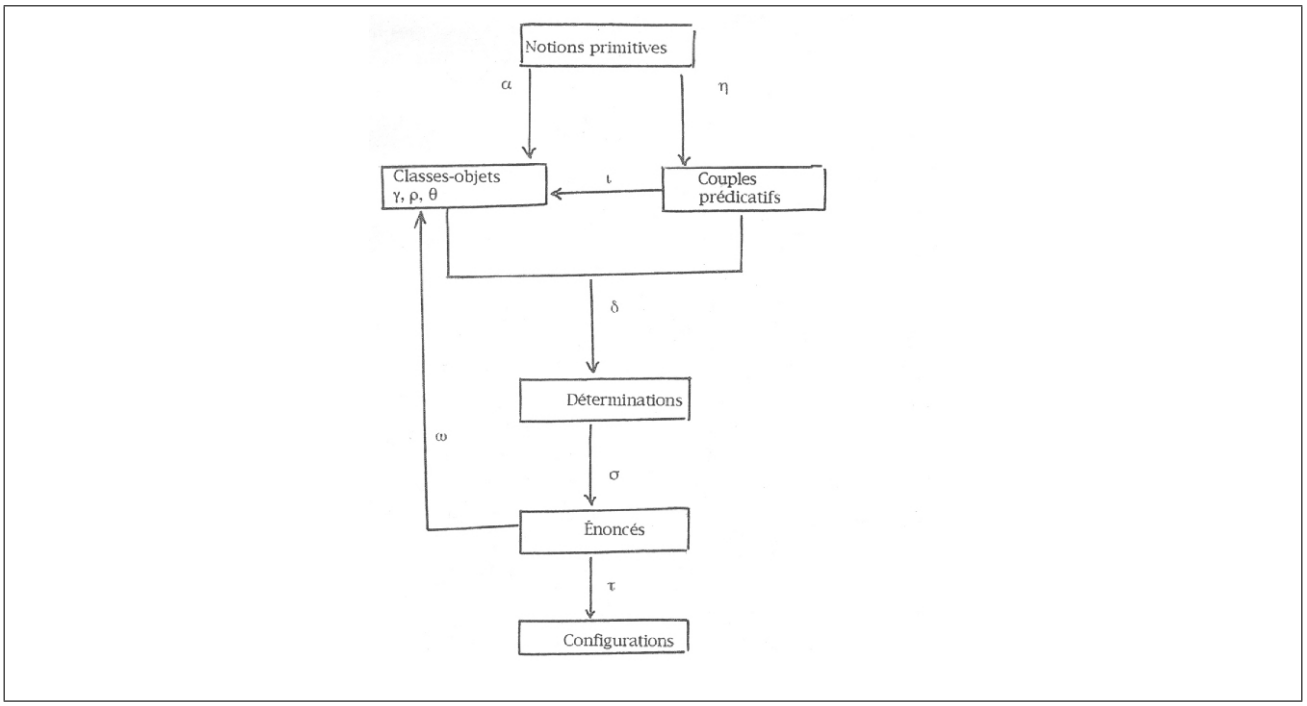


FIGURE 3.7 – Schéma présentant l'ensemble des objets et opérations de la logique naturelle (Grize, 1996, p. 104).

Les *objets de discours* ou *objets de pensée* tels qu'ils apparaissent et sont utilisés dans le discours et l'interaction verbale sont conceptualisés comme des *classes-objets*. Le concept de *classe* se réfère à la méréologie de Leśniewski (Grize, 1982), qui a pour particularité de considérer qu'une *classe* ne contient pas seulement ses éléments mais également les parties de ses éléments. Appliquée à la sémantique, cette conceptualisation de la *classe* a pour conséquence de la considérer toujours ouverte - on peut toujours ajouter à la *classe* quelque élément - et de lui permettre de contenir un nombre infini d'éléments, puisqu'il est pratiquement toujours possible de spécifier (la famille d'opération γ_i) un élément appartenant déjà à la *classe-objet* en des parties plus précises, ou selon un aspect particulier, etc.

Par ailleurs, ces *classes* sont des classes de quasi-équivalence, au sens où ce qui s'y trouve est plus ou moins équivalent du point de vue du contenu. La définition de la quasi-équivalence est délibérément floue, afin de représenter le raisonnement naturel lorsqu'il construit un objet de pensée par le discours [244].

244. L'exercice d'*association libre* utilisé en psychanalyse ou dans de nombreuses recherches sur les représentations sociales constitue une illustration du pendant psychologique de ce que Grize cherche à qualifier sur le plan logique en proposant des classes de *quasi-équivalence*.

Il y a une place, dans les opérations de la logique naturelle, pour une représentation antérieure au langage, ce que Piaget nomme *la pensée représentative* : une pensée telle qu'elle est vécue par l'individu avant qu'il ne l'exprime [245] - et par conséquent l'élabore et la développe - dans et par le langage. Ce sont, chez Grize, les *notions primitives* qui jouent ce rôle de point de départ pré-langagier. En conséquence, la *notion primitive* est toujours plus riche que sa sémantisation, et parfois plus pauvre sous un autre aspect. Prenons l'exemple d'une pomme. La notion primitive consistera en un ensemble de propriétés perceptives, telles que la couleur ou la forme, le goût voire les souvenirs d'enfance qu'évoque pour la personne l'odeur des pommes au four (les tartes aux pommes de grand-maman), de telle sorte que la sémantisation d'une telle notion primitive à l'aide de l'opération α peut conduire à un grand nombre de classes-objet différentes. Pour le dire autrement, la *notion primitive* n'est jamais *épuisée* par sa sémantisation, ce que Proust a démontré en tentant justement de le faire au sujet d'une certaine madeleine. Inversement, la sémantisation peut, en particulier lors d'un usage littéraire ou scientifique de la langue, conduire à élaborer et enrichir la *notion primitive* : si la pomme est construite dans la schématisation comme une classe-objet {pomme, golden}, sa catégorisation précise parmi les nombreuses espèces de pommes permet peut-être de préciser la pensée - la *notion primitive* du locuteur - en particulier dans notre exemple pour une personne qui ne différencie pas d'emblée les diverses espèce de pomme dans sa perception du fruit, et apprend à ce moment-là qu'il existe différentes espèces, comment les reconnaître, etc. Dans le cas particulier de l'apprentissage, la sémantisation des *notions primitives* joue dès lors un rôle important permettant à la fois d'obtenir une trace, toujours partielle, de la pensée de l'élève, mais permettant aussi d'observer au fil du temps l'acquisition d'un usage plus technique et précis de la langue - le cas échéant - qui, en retour, affine la pensée de l'élève.

La notation d'une *notion primitive* se fait à l'aide d'une expression langagière placée entre deux barres verticales, p.ex. |notion primitive|, qui permet de rappeler qu'une telle désignation est paradoxale, puisqu'il est forcément inexact d'utiliser une expression langagière pour désigner une représentation précisément prélangagière, avant sa mise en mots ou sémantisation. Cela permet néanmoins de se comprendre si l'on souhaite désigner de telles *notions primitives* au cours des analyses logico-discursives, moyennant les précautions nécessaires à l'analyse sur le fait que le chercheur n'a aucun moyen d'exprimer adéquatement le contenu d'une telle notion primitive, sinon ses propres inférences sur ce qu'elle pourrait être et l'assomption que le locuteur sémantise au plus près de ses représentations. Si j'entends un enfant hurler "j'ai mal !" alors qu'une pierre tombe sur son pied, je pourrais analyser le cri comme une sémantisation d'une *notion primitive* |douleur| sans trop de risque de me tromper : néanmoins, une telle analyse ne repose que sur mes inférences de chercheur, et sur l'assomption que l'enfant exprime effectivement sa perception de douleur et qu'il n'est pas en train de me tromper en jouant au blessé. Une autre analyse possible du même énoncé pourrait me conduire à inférer qu'il s'agit d'une *notion primitive* |appel|, en considérant que "j'ai mal !" est un appel au secours. Elle est toute aussi pertinente que la première, et ne la contredit pas. Il y a donc évidemment beaucoup d'arbitraire dans l'énonciation par l'analyste d'une *notion primitive*. Ce n'est cependant pas très important, à mon avis, car l'analyse repose sur ce qui se passe après la sémantisation, au niveau des opérations suivantes.

245. Le terme "pensée" ici n'est peut-être pas adéquat, ou au moins à prendre dans un sens plus large que celui de la *cognition*, car cette "pensée" comprend naturellement aussi des émotions, des sensations, etc.

Ainsi, les inférences du chercheur concernant les *notions primitives* peuvent conduire à plusieurs possibilités, parmi lesquelles il ne dispose pas toujours de critère pour décider. Il est néanmoins utile dans certains cas de proposer la formulation d'une *notion primitive*, selon l'analyse et la situation, et il est parfois possible de justifier les inférences du chercheur par des éléments de cette situation. Le concept de *notion primitive* permet par exemple à l'analyste de faire quelque inférence mettant en relation la matérialité d'une situation et la construction du discours : ainsi, un déictique peut être analysé comme une sémantisation d'une *notion primitive* identifiée comme étant l'objet sur lequel se porte l'attention du locuteur et dont l'identification, par inférence du chercheur, peut être justifiée à l'aide de la direction du regard du locuteur, du contexte de l'énonciation, du thème de la conversation, etc.

L'opération de sémantisation α, que Grize nomme *opération d'ancrage*, permet d'amener dans le discours quelque chose de nouveau à partir d'une notion primitive, d'ancrer le discours dans des perceptions ou représentations, que celles-ci soient des représentations individuelles ou sociales, issues du préconstruit culturel. Cette *opération d'ancrage* d'une *classe-objet* est fondamentale à la construction de sens, et elle engage immédiatement la schématisation au sens où il s'agit pour le locuteur d'un choix : extraire {mansarde} ou {villa} de |maison| engage d'emblée la schématisation quant au référent (le terme choisi peut conduire à un malentendu), quant à l'éclairage de la schématisation (on peut vouloir insister sur la qualité de la maison) ou même sa finalité (s'il s'agit de vendre l'objet, "villa" est plus approprié quand bien même on la partagera avec un autre propriétaire).

La barre verticale "|" utilisée pour les *notions primitives*, l'accolade "{" utilisée pour les *classes-objets* et - plus loin - la parenthèse "(" que j'utiliserai pour les *déterminés* permettent d'une part de délimiter un contenu inclus par rapport à la suite du texte, et d'autre part de préciser le statut de l'objet désigné : |notion primitive|, (déterminé), {classe-objet}. Ainsi, nous pouvons, comme en mathématiques, distinguer les objets à l'intérieur d'une phrase, par exemple : "{pomme}, {poire}, et {prune} sont des exemples des élèves, alors que l'enseignant demande un {exemple de fruit}..." Cela permet également de distinguer le discours dont on parle et ce que l'on en dit lors de l'analyse.

Le choix d'un *prédicat* constitue une opération d'ancrage distincte dans la notation de Grize (η). Pour Grize (1996), les *classes-objet* et les *prédicats* sont fondamentalement différents du fait que les premières ne peuvent être niés alors que les second le peuvent. Quand il désigne un *prédicat* avant qu'il ne soit affirmé ou nié, Grize le précède du symbole $\pm$, comme dans $\pm aimer$, qui peut être déterminé de deux manières : $aimer$ ou $ne\ pas\ aimer$. Les prédicats peuvent aussi être utilisés sous une forme indéterminée, par exemple dans une question : "est-ce que tu m'aimes ?". Pour les prédicats, j'introduis une nouvelle délimitation à l'aide d'une police d'écriture différente et italique, $comme\ ceci$. J'ai ajouté cette convention d'écriture, inspirée de la délimitation que Grize introduit pour les classes-objets, car elle m'a manqué dans la pratique des analyses. En effet, un prédicat peut être composé de plusieurs mots, et il convient de mentionner le moment où il s'arrête quand on le cite dans une phrase.

Une fois une *classe-objet* construite dans une schématisation donnée, celle-ci peut être reprise, ce qui se fait souvent en y apportant quelques transformations. Pour la logique naturelle, reprendre le référent

de “maison” par “chalet” sera considéré comme une opération qui vient transformer la *classe-objet* : on a désormais la *classe-objet* {maison ;chalet}. L'étude de la langue parlée a montré (voir p.ex. : Blanche-Benveniste, 1997) combien le discours se cherche, notamment par des *entassements paradigmatiques* ou *syntagmatiques*, que ce fonctionnement par enrichissement progressif des *classes-objets* permet justement de traiter dans l'analyse. Dans la présentation des opérations citée ci-dessous, Grize regroupe toutes les *opérations d'objet* (Grize & de Montmollin, 2008, p. 68) dans une famille désignée par γ_i. Dans son ouvrage plus détaillé, Grize (1996) distingue des opérations sur les faisceaux qui construisent l'objet à partir de l'une de ses parties (γ_1, p.ex. : “la maison...” “la cuisine...”), à partir d'un processus interne à l'objet (γ_2, p.ex. : “la maison...” “la rénovation...”), à partir d'un état ou d'une qualité (γ_3, p.ex. : “la maison...” “la luminosité...”), à partir d'une extension ou dimension (γ_4, p.ex. : “la maison...” “les maisons d'à côté...”), des opérations qui se réfèrent à un domaine (ρ, p.ex. pour le domaine économique : “la maison” “le prix...”) ou encore des opérations de reprise, comme l'utilisation d'un synonyme (θ_0, : p.ex. “maison...” “habitation...”), de terme du genre prochain (θ_1, : p.ex. “maison...” “chalet...”), de métonymie (θ_2, : p.ex. “maison...” “foyer familial...”), de terme basé sur un jugement de valeur (θ_3, : p.ex. “maison...” “petit paradis...”), ou encore de terme sans contenu (θ_4, : p.ex. “maison...” “chose...”).

Les opérations ι et ω sont nommées *opérations d'extraction* d'une classe-objet pour les distinguer des *opérations d'ancrage* dans une *notion primitive* (α et η). En effet, il ne s'agit pas d'une sémantisation à partir d'une notion primitive au même titre que l'opération α, mais de l'introduction d'une nouvelle classe-objet à partir d'un prédicat (ι) ou d'un ou plusieurs énoncés (ω).

L'opération de détermination δ est multiple, au sens où Grize distingue plusieurs choses parmi ce qu'elle opère dans la schématisation :

— elle opère à la détermination de la valeur d'un verbe (affirmation ou négation), p.ex. $aimer$;

— elle opère à l'application du verbe à plusieurs *classes-objet*, qui constitue le *jugement* au sens philosophique du terme dont Piaget fait usage, p.ex. $aimer$ (la philosophie) ;

— elle opère à d'éventuelles localisations (λ) dans le temps et l'espace, voire à certaine conditions, p.ex. $aimer$ (la philosophie), mais pas à l'école ;

— elle opère d'éventuelles modulations (μ), p.ex. $aimer$ intensément (la philosophie), mais pas à l'école ;

— et elle opère d'éventuelles modalisations (également notées μ), p.ex. toujours $aimer$ intensément (la philosophie), mais pas à l'école.

Grize fait parfois référence au nombre de “places libres” d'un prédicat, notée par des points ronds noirs entre parenthèses, p.ex. (•, •) pour deux “places”. Le nombre de “places libres” correspond au nombre d'objets auquel le prédicat s'applique, et dépend du prédicat en question et parfois de sa signification. Par exemple, le prédicat $\pm manger$ peut avoir une ou deux “places libres”, selon qu'il signifie que la personne opère un certain type d'activité - p.ex. “elle mange” - ou qu'il signifie ce que la personne assimile comme nourriture - p.ex. “elle mange une pomme”. Les “places libres” peuvent également rester indéterminées à

l'occasion, comme dans l'exemple de Shakespeare "être ou ne pas être", quoique la situation d'interlocution de la pièce de théâtre conduira sans doute à interpréter, mais sur la base d'un implicite, que le prédicat s'applique à {Hamlet}. En logique naturelle, l'opération de détermination s'applique à une *classe-objet* sans faire la distinction linguistique entre *sujet* du verbe et *complément d'objet* : les "places libres" désigne autant l'agent de l'action du verbe, celle ou celui qui mange, que l'objet mangé. Selon la signification du prédicat $\pm manger$ utilisée par le locuteur, l'opération de détermination détermine l'application de ce prédicat à une classe-objet (p. ex. "je mange") ou deux classes-objets (p.ex. "Je mange une pomme") dans la schématisation.

L'opération σ représente l'engagement énonciatif, et constitue également une opération multiple (ou "polyopération") :

— elle introduit un énonciateur, p.ex. "Hamlet pense que..." ;

— elle spécifie l'engagement énonciatif, p.ex. avec des verbes comme "croire que", "dire que", "penser que", "prétend savoir que", etc. ;

— elle détermine éventuellement le moment de l'énonciation à travers l'usage d'un temps verbal.

Dans les échanges verbaux, cet engagement énonciatif est souvent implicite, mais en l'absence de toute expression spécifiant l'énonciateur et son engagement, un locuteur à l'oral peut minimalement être considéré par l'analyste comme s'engageant par un "je dis que...", à condition bien entendu que le contexte énonciatif ne se réfère implicitement à une autre voix, p.ex. si le locuteur est en train d'interpréter un personnage, rapporter un discours, etc. Certaines formules du langage, selon la langue utilisée, permettent également de laisser entendre que l'énonciateur, justement, ne s'engage pas, comme dans l'expression "comme dirait l'autre, le travail c'est bon pour la santé", le locuteur indique qu'il reporte une opinion qu'il ne partage pas forcément, à laquelle il ne s'engage pas : il n'en est pas l'*énonciateur*[246], au sens que la logique naturelle donne à ce terme.

L'opération d'organisation raisonnée (τ) regroupe un ensemble d'opérations que Grize n'a pas systématiquement spécifiées dans ses écrits, quand bien même les travaux qu'il a menés sur la contradiction (Grize & Piérault-Le Bonniec, 1983), et ceux de Miéville (1981, 1992) sur l'explication et l'étayage, par exemple, montrent l'étendue et la complexité des recherches qu'il reste à faire sur ce point. L'opération d'organisation raisonnée permet de caractériser les liens entre des énoncés, qui va bien au-delà de l'analyse de l'usage des connecteurs d'un langue : elle permet de se poser la question de la nature des relations logiques entre énoncés telles qu'elles sont constitués par l'usage d'une langue naturelle, qui n'a justement pas la technicité du langage technique d'une logique des prédicats - ou d'autres systèmes savants permettant d'éliminer autant que faire se peut l'ambiguïté et la polysémie. Ainsi, Grize (1996) attire l'attention sur le fait que les connecteurs langagiers (p.ex. "et", "car", "si... alors") ne correspondent souvent pas, dans l'usage, aux relations spécifiées par les opérateurs de la logique formelle (p.ex. booléenne).

246. Ceci me fait penser que l'*énonciateur*, chez Grize, est proche du concept de *voix* de Bakthine, en toute bonne cohérence avec son postulat dialogique, et qu'il doit être précautionneusement distingué du *locuteur*, c'est-à-dire la personne qui émet le discours à l'oral ou qui l'écrit.

Même pour un connecteur linguistique aussi simple que le "et" français, *l'organisation raisonnée* qu'il opère dans une schématisation peut être fort différente selon les usages : cette opération peut articuler deux énoncés comme une suite temporelle - p.ex. dans une narration "il mit sa main sur la poignée et appuya" - ou de conséquence - p.ex. dans "je vais envoyer un e-mail et tout le monde sera au courant" - ou encore comme une conjonction au sens de la logique formelle - p.ex. dans "il a acheté une voiture et un abonnement de train". La valeur logique de ces opérations d'organisation raisonnée demeure souvent relativement indéfinie si on la compare à des opérateurs de logique formelle, et Grize propose en conséquence de garder le ou les termes du langage vernaculaire qui sont effectivement utilisés par le locuteur lorsqu'on veut représenter l'opération, afin de la travailler en gardant son caractère ouvert et indéterminé, le cas échéant. La question de la qualitification de ce lien logique se pose, cependant, singulièrement pour chaque usage et en fonction du contenu (voir les exemples ci-dessus) et en fonction de la situation d'interlocution.

Une autre remarque que fait Grize (1996) pour distinguer la démarche de la logique naturelle de celle de la logique formelle, consiste à souligner que les opérations d'organisation raisonnée ne peuvent pas toujours être inversées sans les modifier, comme c'est le cas pour des opérateurs logiques tels que la conjonction. En effet, "p $\wedge$ q" est identique à "q $\wedge$ p" en logique formelle, alors que "je nettoie la voiture et je viens" n'est pas identique à "je viens et je nettoie la voiture" dans un raisonnement discursif naturel. Il s'agit là notamment d'une conséquence du maintien des contenus dans l'analyse de logique naturelle, mais aussi de ce caractère partiellement indéterminé des opérations τ telles qu'on les trouve dans le raisonnement discursif. Par exemple, "il a vendu sa voiture et acheté une moto" ne suggère pas tout-à-fait la même articulation que "il a acheté une moto et vendu sa voiture", quand bien même il ne s'agit pas forcément d'une séquence d'événements, le locuteur cherchant peut-être plutôt à suggérer que l'argent gagné en vendant la voiture lui a permis d'acheter la moto, dans le premier cas, alors que c'est la redondance des deux véhicules qui explique la vente de la moto dans le deuxième cas. Dès lors, un aspect important pour toute analyse de logique naturelle est la *direction* de la relation établie par les opérations d'articulation, direction représentée par une flèche horizontale dans la notation de logique naturelle.

Mais les opérations d'organisation raisonnée ne relient pas seulement des *énoncés*, elles peuvent également relier des *déterminés*, c'est-à-dire qu'elles peuvent organiser des relations entre *prise en charge* (σ) et *déterminations* (δ) de différentes manières possibles. Ces opérations interviennent ainsi dans une hiérarchisation des énoncés et/ou déterminés de la schématisation. Grize (1982) avait d'abord tenté d'utiliser la notation de Frege pour ces configurations du discours, mais les versions les plus récentes de la logique naturelle ne reprennent pas cette notation. Je discuterai mes choix quant à la notation à la section suivante.

Je n'ai repris dans cette brève introduction sur les opérations logico-discursives que le strict minimum de la littérature de la logique naturelle, dans l'unique but de me préparer aux analyses empiriques pour cette recherche. Une présentation plus complète des opérations logico-discursives se trouve dans l'ouvrage *Logique naturelle et Communication* (Grize, 1996), et une présentation des spécificités de l'approche de Grize de l'argumentation, par rapport à d'autres théories, se trouve en français chez Plantin (2005) et en anglais dans le *Handbook of Argumentation Theory* (Eemeren et al., 2014).

En plus de ma synthèse ci-dessus, j'ai choisi de reproduire ci-dessous l'intégralité de l'annexe à l'ouvrage de Grize et de Montmollin (2008), vu le caractère succinct des explications fournies dans cet annexe, et le fait que c'est la dernière présentation systématique en date des opérations logico-discursives par Grize. Voici cette longue citation :

> ***Questions de méthode***
>
> *On affirme souvent que la connaissance scientifique résulte par induction de l'observation des faits, ce qui finalement ne dit pas grand'chose. L'induction dans son acception commune n'est en effet que "l'opération mentale qui consiste à remonter des faits à la loi" (Robert). Claude Bernard cependant avait déjà insisté sur le rôle fondamental que jouait la formation d'hypothèses de sorte que pour lui, il y a bien entendu au départ l'observation de faits, mais les faits ne sont pas donnés en eux-mêmes, ils dépendent du regard que l'on porte sur les choses. Ainsi les primevères ont cinq pétales mais ce sont aussi des dicotylédones. Le regard n'est donc pas neutre et dépend de présupposés qui restent en général implicites. De là une première démarche de l'esprit,* l'abduction*, qui consiste à formuler une hypothèse, par exemple que les dicotylédones ont cinq pétales. Enfin la troisième étape est celle de la vérification expérimentale des conséquences et c'est elle que Peirce appelle* l'induction*. Ce sera donc aussi par abduction que procédera essentiellement la logique naturelle.*
>
> *D'autre part, il est impossible de formuler des hypothèses à partir de rien. Si l'on cherche à construire une logique formelle, il faut se donner des formes comme point de départ (des lettres, des chiffres ou d'autres graphismes) et si l'on vise à construire une logique des contenus, il faut se donner des contenus. C'est ce que fait la logique naturelle en posant l'existence de* notions primitives *(NP). Ce sont des contenus de pensée latents, "des systèmes de représentations complexes de propriétés physico-culturelles, c'est-à-dire des propriétés d'objet issues de manipulations nécessairement prises à l'intérieur de cultures" (Culioli). C'est à la psychologie de déterminer la façon dont les NP existent dans la pensée, la logique naturelle, elle, se contentera de poser deux opérations de sémantisation α et η, telles que :*
>
> *α (NP) $\Rightarrow$ nom d'objet et η (NP) $\Rightarrow$ couple prédicatif à n places.*
>
> *La fleur de l'églantier sent ses bourgeons éclore donne ainsi :*
>
> *α (NP) $\Rightarrow$ fleur et η (NP) $\Rightarrow$ (éclore/ne pas éclore),noté tout simplement $\pm$ (éclore). Si j'ai jugé bon d'introduire des couples de prédicats au lieu de simples prédicats, c'est parce que, en général, ne pas faire une chose n'équivaut pas à faire l'inverse. "Ne pas marcher" peut aussi bien signifier "rester assis" que "courir".*
>
> *Je vais m'inspirer de la théorie des catégories logico-sémantiques, telles que Tarski (1933) et Adjukewicz (1935) les ont introduites. Je poserai que les objets appartiennent à une catégorie* N *et que les prédicats et les couples prédicatifs appartiennent à une catégorie* P*. Il faut d'ailleurs souligner qu'un même mot peut renvoyer selon la contexte à l'une ou à l'autre des catégories. Dans "le boucher est Marocain" et "il faut boucher le trou", le mot "boucher" appartient une fois à* N*, une fois à* P*.*
>
> *Les noms d'objet sont entourés d'un* faisceau d'aspects *et les noms de prédicats d'un* champ de prédicats *qui, à l'instar des NP, sont fonction du groupe social de ceux qui l'utilisent. Avant 1895 au USA, avant 1899 en Suisse et avant 1900 en France, le faisceau de* locomotive *contenait* machine à vapeur *;* partir *contient* mourir*, (partir c'est mourir un peu) et bien des chrétiens disent d'un défunt, qu'il est parti rejoindre le Seigneur. Faisceaux et champs relèvent ainsi des préconstruits culturels (PCC) des locuteurs et, comme les mots dont nous nous servons ont déjà beaucoup servi,*

ils dépendent aussi d'autres textes. Lorsque Georges Lautner intitule l'un de ses films Une femme peut en cacher une autre, il est fort probable que les écriteaux que la SNCF a placés aux passages à niveau y soient pour quelque chose (question de danger !).

J'introduirai encore deux autres catégories qui trouvent leur justification par les opérations de détermination δ et d'énonciation σ dont je parlerai tout à l'heure. Ce seront d'une part la catégorie ***D*** *des déterminations qui sont des contenus de jugement ni vrais, ni faux (Frege) et d'autre part celle des énoncés* E. Que Joséphine Baker avoir deux amours *est une détermination de l'objet* Joséphine Baker *par le prédicat* avoir deux amours *et* Joséphine Baker avait deux amours *est un énoncé qui résulte de la prise en charge par l'auteur de la détermination.*

Ces catégories vont permettre de situer par composition les diverses opérations de la logique naturelle.

Quelques opérations de la logique naturelle

Il est possible de répartir les opérations logico-discursives en cinq espèces (γ, μ, ρ, σ, τ) dont deux (γ et τ) constituent des familles.

Opérations d'objet γ_i

Il en existe toute une famille qui font passer de la catégorie ***N*** *à la catégorie* ***N****, donc d'un nom à un nom. La plupart sont unaires, ainsi par exemple l'opération γ_i qui assure le passage de* orange *à* pépins*, celle γ_2 qui limite l'extension de orange et fait passer* orange *à* orange sanguine*. Ici se pose un problème : faut-il concevoir ces opérations comme des extractions des faisceaux d'objet donc des PCC (ndla : préconstruits culturels), ou non ? L'exemple des pépins d'orange semble conduire à répondre affirmativement : si une orange n'a pas de pépins, le marchand explicitera la chose. En revanche, le passage de* orange *à* orange mécanique *conduite à en douter. La qualification ne résulte vraisemblablement que de la décision de Stanley Kübrick et me semble être du ressort du psychologue, voire du psychanalyste. Le logicien se contentera de postuler qu'il existe une opération γ_2 qui, appliquée à un objet en réduit l'extension, de même qu'il posera l'existence d'une opération γ_1, qui appliquée à un objet en détermine une partie sans que celle-ci figure nécessairement dans le faisceau actuel de l'objet. C'est ainsi que, en 1896, Jules Verne, décidait de doter d'un moteur électrique le véhicule de* Robur le Conquérant *qui se déplaçait sur terre, sur mer, sous l'eau et dans les airs. L'observation des discours conduit à poser d'autres opérations γ, mais ceci n'est pas un cours et je n'en signalerai qu'une qui est binaire, celle qui fait passer par exemple de* pile *et de* face *à* pile ou face*. On joue en effet "à pile ou face" mais jamais "à pile" ou "à face".*

Soit l'objet de pensée "Albert Einstein". Le GDEL *lui associe la classe {physicien, citoyen suisse, publie dans les* Annalen der Physik*, à l'origine de la théorie quantique...}. Un autre auteur, celui de l'*Encyclopédie Alpha*, lui associe la classe-objet {physicien, allemand, professeur de physique et de mathématiques, théorie du photon...}. Ces ensembles d'opérations permettent d'associer à tout objet de pensée une* classe-objet *qui est de nature méréologique*[2] *et non pas distributive comme le sont les classes booléennes. Il est remarquable que ces classes-objet ne peuvent être déterminées que coup par coup. Elles ne peuvent être saisies que partiellement à travers les discours tenus en situation. Il faudrait donc avant de connaître* la *classe-objet associée à Einstein avoir lu tous les livres. Il faut ainsi se contenter de procéder de cas en cas et de déterminer le contenu de la classe-objet qu'un auteur a construite dans un texte donné. Je poserai qu'une classe-objet appartient aussi à la catégorie* ***N****.*

Opération de prédicats μ

Je ne considérerai ici qu'une seule opération de la catégorie ***P*** $\setminus$ ***P****, c'est-à-dire qui fait passer d'un prédicat à un autre, plus exactement d'un couple prédicatif à un autre. Ce sera l'opération μ*

de modulation. Un couple prédicatif est donc un couple fait d'un prédicat et de son contraire comme (être chaud, être froid), que je noterai simplement (± être chaud). Il s'agit de deux prédicats à part entière. Sans pouvoir être *à la fois chaud et froid, un café peut ne pas être chaud et en même temps* ne pas être *froid. Il suffit qu'il soit tiède. Dès lors on aura par exemple μ (chaud, froid) ⇒ (très chaud, très froid). L'introduction des couples prédicatifs se montre très utile pour traiter de la négation. Soit par exemple μ (± marcher) qui fait passer à (± marcher rapidement). Celui qui affirme alors que "le viel homme ne marchait pas rapidement", ne nie pas qu'il marchait mais qu'il ne le faisait pas sur le mode de la rapidité.*

Opération de détermination *δ*

L'opération δ est celle qui, appliquée à un objet et à un prédicat, fournit une détermination, et elle est donc de la catégorie ***NP\ D*** *: δ (Roméo, ± être amoureux) ⇒ que Roméo être amoureux. En fait il s'agit d'une polyopération en ceci qu'elle choisit une des valeurs du couple prédicatif et qu'elle y instancie une classe-objet à sa place libre ou, en général, à ses places libres. Je pense, mais je ne domine pas suffisamment les catégories logico-sémantiques, pour en être certain qu'il est possible d'identifier la catégorie* ***D*** *à une composition des catégories* ***N*** *et* ***P****, de sorte que tout prédicat serait traité comme un opérateur.*

Opération de prise en charge *σ*

C'est aussi une polyopération. Elle fait passer de la catégorie ***D*** *des déterminations à leur énonciation circonstancielle* ***E*** *: σ (*que neiger sur le Kilimandjaro*) ⇒ il a neigé sur le Kilimandjaro.*

*σ a trois effets principaux. 1) Elle situe la détermination dans le temps et dans l'espace. 2) Elle fait prendre la détermination en charge par un locuteur en situation. 3) Elle modalise cette prise en charge : σ (*que le Président être en voyage*) ⇒* le Président serait en voyage *ou* la presse annonce que le Président est en voyage *(effet parapluie dans l'argumentation).*

Opération d'organisation raisonnée *τ_i*

*Elles servent à composer des énoncés entre eux, à passer par exemple de deux ou plusieurs énoncés à un seul. Ainsi τ (*Je passerai l'été à la montagne, Je ferai une croisière en Méditerranée*) ⇒* Je passerai l'été à la montagne *ou* Je ferai une croisière en Méditerranée.*De même τ (*Il pleut, Le vent souffle, Il ne prend pas de parapluie, Il enfile un imperméable*) ⇒* Quand il pleut et si le vent souffle, il ne prend pas de parapluie mais il enfile un imperméable.*Les termes* ou, quand, et, si, mais *jouent le rôle de foncteurs logiques mais il convient de faire deux remarques. L'une est que leur présence n'est pas motivée par la valeur de vérité des énoncés mais pas leurs contenus et l'autre que quand et mais n'ont pas d'équivalent en logique mathématique.*

Notons enfin l'importance de distinguer dans le contexte "naturel" entre déduction et inférence. Une déduction consiste à tirer une conséquence d'un élément d'une classe-objet. La classe-objet "multiple de 6" contient "nombre pair", donc six est multiple de 6, x est pair*. Une inférence se sert de ce que l'on peut appeler un Principe commun, c'est-à-dire une relation admise par les interlocuteurs concernés. Ainsi en est-il dans le dialogue suivant* - Le secrétaire n'est pas là ? - Non, c'est jeudi*. Principe : Le secrétaire fait son bridge tous les jeudis.*

(Grize & de Montmollin, 2008, pp. 66-71)

[2] *: Une classe météorologique contient non seulement les éléments qui la constituent, les planètes par exemple, mais ce qui leur est directement lié, les taches rouges de Mars, la lune de la Terre, les anneaux de Jupiter, etc.*

Cette longue citation permet de mieux comprendre la nouvelle perspective théorique que Grize a adoptée dans ses derniers travaux pour constituer les opérations de la logique naturelle. Elle apporte également quelques modifications des conventions de notation. Cependant, Grize n'y présente pas l'ensemble des

opérations, ce qui tient sans doute au fait qu'il s'agit d'être aussi bref que possible dans cette annexe à un ouvrage dont le but n'est pas de présenter la logique naturelle dans son ensemble, comme Grize le signale en écrivant "mais ceci n'est pas un cours" (Grize & de Montmollin, 2008, p. 69).

Dans la section suivante (section 3.3.6, p. 210 et suivantes), je discute ces opérations logico-discursvies en vue de leur utilisation dans une démarche d'analyse en sciences humaines, et propose de modestes précisions et ajouts issus de ma propre utilisation de l'œuvre de Grize.

3.3.6 Synthèse et ajustement de la terminologie

3.3.6.1 Une démarche d'analyse pour les sciences humaines

La sémiologie s'intéresse aux *usages* des signes, dans une société et à un moment historique donné. En ce sens, elle est transversale à toutes les sciences humaines : Grize souhaitait effectivement mettre sa démarche d'analyse à disposition du sociologue (voir p.ex. : Apothéloz et al., 1989 ; Grize, Vergès, & Silem, 1987 ; Vergès, 1997, 2001, 2010), du psychologue (voir p.ex. : Grize, 1993) et des chercheurs d'autres sciences sociales et humaines.

Mais pour réussir cette transversalité disciplinaire lors des analyses sémiologiques, l'œuvre de Grize nécessite une appropriation par les chercheurs de sciences humaines sous la forme d'une démarche méthodologique coordonnée à leurs références théoriques et dans l'étude d'un objet spécifique des activités humaines. Grize (1993) en fournit un exemple en montrant que la logique naturelle permettrait l'étude des représentations sociales, mais c'est sans doute les usages de Vergès (2001, 2010) et de Campos (2010) qui sont les plus proches d'une réalisation concrète de l'idée de ces analyses sémiologiques dans les sciences humaines sur un objet de recherche particulier.

La littérature de la logique naturelle comprend plusieurs tableaux pour présenter les résultats (voir par exemple Borel et al., 1992, pp. 139-145), mais ils sont tous différents du fait qu'ils s'adaptent au contenu à présenter. Il n'y a donc pas de démarche systématique à reprendre telle quelle. Je proposerai ainsi également des tableaux différents au cours de mes analyses, spécifiquement adaptés aux questions que soulève mon enquête. Cette façon de travailler s'explique par l'importance que donne la logique naturelle à l'activité discursive *dans son ensemble*, et notamment à la manière dont la reconstruction du sens du point de vue de chaque interlocuteur se fait en lien avec la situation d'interlocution :

> *D'autre part, comme je l'ai souligné, les mots de la langue renvoient tout à la fois à leur objet (objet du signe) et à un référent. Il s'ensuit que le résultat de l'application d'une opération α ou η n'est pas nécessairement le même pour le locuteur et pour le destinataire. On peut même dire que, sitôt qu'il ne s'agit pas d'un concept, l'activité globale discursive est nécessaire pour assurer un accord suffisant entre les interlocuteurs.*
>
> *(Grize, 1990, p. 86)*

Dans le but de mettre en œuvre une telle démarche dans cette recherche, je présente ci-dessous quelques ajustements personnels me permettant d'établir la notation et le mode de fonctionnement de mes analyses, et quelques commentaires explicitant la manière dont je me suis approprié la logique naturelle pour cette recherche.

3.3.6.2 Ajustement de la terminologie

La logique naturelle comprend un langage formaté (et non un langage formel) basé sur des conventions typographiques que Grize n'explique pas toujours. Je considère ces conventions d'écriture comme une aide à la communication, et comme une pratique indispensable à établir l'usage technique que nécessite la la logique naturelle. S'il peut paraître fastidieux d'apprendre ces conventions et de les employer, je suis convaincu que ce langage formaté permet d'être plus précis avec moins d'effort que s'il fallait le faire sans convention, et qu'il est utile d'expliciter les usages au lecteur.

A quoi servent ces conventions ? Elles peuvent être considérées comme une information complémentaire au contenu exprimé par la langue naturelle sur le statut des objets dont on parle. Ainsi, écrire *pomme, |pomme|, ou {pomme}* permet d'éviter d'écrire *la pomme en tant qu'objet dans le monde, la pomme en tant que notion primitive dans les représentations ou les préconstruits culturels, la pomme en tant qu'objet de discours (classe-objet)*, ce qui est tout de même considérablement plus long et fastidieux qu'une typographie rigoureuse. Certes, le discours, même à l'écrit, se passe souvent de toutes ces spécifications. Mais c'est justement lorsqu'il s'en passe qu'apparaissent des usages illégitimes conduisant à des malentendus entre interlocuteurs [247]. En effectuant une recherche sur les situations de malentendu, je ne peux me permettre de prendre inutilement le risque de susciter par ma propre pratique. C'est pourquoi je présente ici également mon usage de la notation dans le détail. Construire une démarche d'analyse du sens que donnent les interlocuteurs selon leur point de vue nécessite, à mon avis, non seulement de *désigner* avec le moins d'ambiguïté possible les *objets du signe*, mais aussi de préciser le statut épistémique des usages du langage. C'est notamment le rôle des conventions discutées dans cette section, et du vocabulaire spécifique que j'ai introduit pour cette recherche.

Pour proposer une vue d'ensemble de ces opérations et des conventions de notation que j'adopte dans cette recherche, je présente ci-dessous quelques symboles utilisés en logique naturelle, et plus loin un tableau de synthèse pour faire référence aux opérations et à leur résultat.

Les accolades, "{ }" permettent, en logique naturelle,de marquer le début et la fin d'une classe-objet, permettant ainsi de regrouper plusieurs termes linguistiques en un ensemble (au sens de la logique), qui constitue un *objet de discours*. Cette délimitation permet d'éviter de confondre l'*objet de discours* avec un terme ou mot employé, et de recomposer les objets de discours selon l'usage spécifique des termes dans une schématisation, et selon le processus de construction progressif de cette schéma-

247. Selon mes observations dans cette recherche, quand en classe de physique le discours se contente de dire "la gravité", pour aller plus vite, au lieu de dire "la force de gravitation exercée par la terre sur les objets à sa surface", les conséquences en termes d'apprentissage ne se font pas attendre.

tisation par un locuteur spécifique, selon la situation de communication et son contexte. Lorsque les accolades sont utilisées dans le discours du chercheur, elles permettent également de signaler au lecteur que les termes linguistiques écrits sont *cités* en tant qu'objet de discours et ne sont pas *utilisés* par le chercheur pour construire sa schématisation. Une classe-objet implicite ou postulée par le chercheur en fonction du contexte, que je cite dans le texte *en tant que classe objet*, sera mentionnée avec les accolades et les crochets marquant l'implicite, par exemple dans l'expression {force [de gravitation]} je cite une classe objet utilisée dans le discours, où le locuteur a effectivement énoncé "force" mais dont je fais l'hypothèse, à l'analyse, qu'il s'agit implicitement de la *force de gravitation* et non d'une autre force.

Le signe "±" précède un prédicat, de manière à indiquer le fait qu'il n'est pas déterminé de manière affirmative (+) ou négative (-) lorsqu'il est cité en tant que prédicat.

Le signe "•" représente le *sujet* ou l'*objet* (au sens de la linguistique) auquel s'applique un prédicat, quand il n'est pas déterminé, ce que Grize nomme "une place vide" ; la différence faite en linguistique entre le *sujet* d'un verbe, et son *objet* direct ou indirect, n'est pas d'usage dans la logique naturelle où cette différence apparaît arbitraire, du moment que nous nous intéressons au contenu du discours : c'est pour cela que Grize désigne cet indéterminé par le terme "place". Pour expliquer ceci, il suffit de produire des exemples où ces fonctions linguistiques de *sujet* ou *objet* sont interchangeables : par exemple, dans la phrase "Sa maison de vacances est désormais son lieu de vie principal" l'objet de discours {maison} aurait fonction de *sujet* en linguistique, alors que c'est le même *objet de discours* en logique naturelle que dans une autre phrase où il aurait fonction d'objet en linguistique, comme "il est parti vivre dans sa maison de vacances". Ainsi, le terme "sujet" est réservé, en logique naturelle comme en psychologie, pour faire référence à la personne, à l'énonciateur ou énonciatrice.

Le tableau 3.1 (voir ci-dessous) fournit pour chaque type d'opération logico-discursive les conventions de notation que j'utiliserai dans cette recherche, plus particulièrement :

1. Le nom (de famille) des opérations.
2. La catégorie (NP, N, P...) du contenu sur lequel s'exerce l'opération, puisque certaines opérations ont la particularité de faire changer de catégorie un contenu, par exemple la sémantisation qui fait passer un contenu sous forme de |notion primitive| à un *objet de discours*, une {classe-objet}, alors que pour d'autres ce n'est pas le cas.
3. La catégorie du produit de l'opération, après la transformation qu'elle effectue.
4. Les conventions de notation de l'opération, où la flèche "⇒" représente l'opération elle-même, ce qui est écrit à sa gauche permettant de spécifier le contenu avant la transformation, et ce qui est à droite le contenu après la transformation effectuée par l'opération.

De manière à faire la différence entre processus et produit, je n'utiliserai les lettres grecques introduites par Grize que pour désigner les opérations elles-mêmes ; les résultats de ces opérations seront désignées par des lettres latines. Selon cette convention d'écriture, à l'opération de détermination δ correspond le

résultat, le déterminé d. De manière à me référer à une opération et à un résultat spécifique lors d'une analyse, j'ajouterai à ces lettres un indice permettant d'identifier l'opération singulière - p.ex. "δ_1" - et le résultat singulier de cette opération - p.ex. "d_1". Pour éviter une surcharge du tableau, les éléments sur lesquels porte les opérations λ, σ et τ ont parfois été abrégés par des points de suspension.

Opérations	**Contenu sur lequel s'exerce l'opération (et catégorie)**	**Contenu produit par l'opération (et catégorie)**	**Convention de notation de l'opération et de ses contenus**
sémantisation	notion primitive (NP)	classe-objet (N) *nouvelle dans le discours*	α |notion| $\Rightarrow$ {classe-objet}
élaboration	classe-objet (N)	classe-objet (N) *modifiée*	γ {classe-objet} $\Rightarrow$ {classe-objet}
reprise	classe-objet (N)	classe-objet (N) *identique*	θ {classe-objet} $\Rightarrow$ {classe-objet}
sémantisation	notion primitive (NP)	couple prédicatif (P) *nouveau dans le discours*	η |notion| $\Rightarrow \pm prédicat$ (•, ...)
modulation	couple prédicatif (P)	couple prédicatif (P) *modulé* OU *modalité*	μ ±prédicat (•, ...) $\Rightarrow \pm prédicat$ (•, ...) modulation OU modalité
extraction	couple prédicatif (P)	classe-objet (N) *nouvelle dans le discours*	ι $\pm prédicat$ (•, ...) $\Rightarrow$ {classe-objet}
détermination	classe(s)-objet(s) (N) & couple prédicatif (P)	déterminé (D)	δ $\pm prédicat$ ({classe-objet}, ...) $\Rightarrow$ (− quantification classe-objet prédicat)
localisation	déterminé (D)	déterminé (D) *localisé*	λ ... $\Rightarrow$ (la localisation, − déterminé)
énonciation	déterminé (D)	énoncé (E)	σ ... $\Rightarrow \frac{énonciateur/-trice, prise\ en\ charge}{(-détermination)}$
organisation raisonnée OU configuration	déterminé (D) énoncés (E) configuré	configuré	τ... $\Rightarrow e_1 \xrightarrow{marquediscursive} e_2$ OU τ... $\Rightarrow d_1 \xrightarrow{marquediscursive} d_2$ OU τ... $\Rightarrow \frac{énonciateur, priseencharge}{(-déterminé)} \xrightarrow{marque} \frac{en., com.}{(-det.)}$ OU τ... $\Rightarrow \frac{énonciateur, priseencharge}{(-déterminé) \xrightarrow{marque} (-déterminé)}$
extraction	déterminé(s) (D) OU énoncés (E) OU configuré	classe-objet (N) *nouvelle dans le discours*	ω (d_1, d_2, ...) OU (e_1, e_2, ...) OU (t_1, t_2, ...) $\Rightarrow$ {classe-objet}

TABLE 3.1 – Synthèse des conventions de notation des opérations logico-discursives utilisées dans cette recherche.

Si je mentionne *détermination*, à la dernière colonne de la neuvième ligne du tableau (ligne "énonciation"), et non *déterminé*, c'est que Grize utilise ce terme pour mentionner l'effet de l'*énonciation* sur le *déterminé*, consistant notamment à spécifier le temps en lien avec cette *énonciation* : le *déterminé* (− que je venir) devient ainsi au cours de l'énonciation une *détermination* (− que je vienne) ou (− que je viendrai) etc. Que "détermination" désigne par ailleurs l'opération n'est pas gênant, me semble-t-il, car au fond l'opération d'*énonciation* a bel et bien un effet sur l'*opération* de *détermination* : il ne me paraît pas abusif

de nommer *détermination* ce *déterminé énoncé*, comme le fait Grize, même si on pourrait effectivement le distinguer de l'opération en le nommant *déterminé énoncé*.

3.3.6.3 Commentaires

Mon premier commentaire concerne le concept d'*opération* utilisé par Grize pour définir les *opérations logico-discursives*. Si les objets de la logique naturelle sont d'un genre nouveau en référence à la théorie piagétienne, il n'empêche que le concept d'opération est utilisé dans un sens identique, celui d'une transformation de l'objet par l'action du sujet, permettant notamment au sujet [248] de connaître quelque chose de son objet par la boucle rétro-active ainsi effectuée.

Je me suis cependant posé la question de savoir si les *opérations logico-discursives* définies par Grize correspondent à des *opérations concrètes*, ou à des *opérations formelles* en épistémologie génétique. L'usage du concept piagétien d'*opérations concrètes* laisse parfois penser que l'opération est dite "concrète" parce que l'objet transformé est matériel, "concret", et que par opposition les *opérations formelles* sont celle où l'objet transformé est "symbolique" (ou sémiotique), "abstrait". Cette distinction laisserait penser que Grize a trouvé une théorie des opérations formelles qui remplace celle de Piaget, puisque la logique naturelle traite des opérations qui transforment les *objets de discours*, un sous-ensemble spécifique des objets sémiotiques. Mais, en fait, la sémiologie de Grize remet en question cette démarcation trop simple. En effet, la logique naturelle propose un modèle des *opérations logico-discursives* qui est explicitement fondé sur une logique de l'action : le sujet épistémique qui transforme la schématisation à l'aide de ces opérations n'effectue pas (toujours) [249] des opérations formelles, car les transformations effectuées ne sont pas réversibles [250]. Elles sont de l'ordre de l'*action*, qui est par définition irréversible. C'est à mon avis là un des coups de génie de la sémiologie neuchâteloise : traiter les *objets de discours* comme des objets concrets. Même du point de vue de la physique, on ne peut guère objecter à cette idée : le signifiant, pour le moins, est aussi concret que la pâte à modeler ou les liquides des épreuves piagétiennes.

248. Le concept de *sujet* est à entendre strictement dans le sens du pôle "connaissant" de la relation dialectique sujet-objet, et non comme l'affirmation ontologique d'un sujet séparé de l'objet comme le conceptualise la philosophie dualiste. En corrolaire, l'objet n'est à entendre comme "objet de connaissance" du *sujet* ou, plus généralement, *objet* de l'attention ou de l'action du *sujet*, mais toujours dans un sens strictement dialectique et relatif au *sujet* et à son action : dans cet usage du concept d'*objet*, il n'y a aucun affirmation ontologique quant à l'existence d'objets dans le monde au-delà de la connaissance humaine que nous pouvons, à des occasions singulières, en avoir.

249. Dans certains cas très particuliers, par exemple dans l'usage d'un langage mathématique, le sujet épistémique peut bien entendu aussi effectuer des opérations formelles en schématisant, encore que l'on se posera la question, à ce moment-là, s'il *schématise* quoique ce soit au sens que Grize donne à son concept, et pas plutôt d'une activité de *modélisation*, voir d'usage d'un modèle qui n'amène justement plus rien de nouveau, ni sur le plan de la communication, ni sur le plan de la connaissance des objets sur lesquels opère le sujet.

250. Plus précisément, je considère les opérations de la logique naturelle des opérations concrètes parce qu'elles sont avant tout des *actions* irréversibles dans le monde - la production du discours oral p.ex. - au même titre que la déformation de la pâte à modeler ou le transvasement des liquides étudiés par Piaget : dans le monde physique, la pâte à modeler a changé de forme, les liquides ont été déplacés, etc. Dans la production du discours, ce qui est dit est dit, et celui qui voudra effacer ce qui a été dit se trouvera parfois confronté à bien des difficultés. Il ne suffit pas, par exemple, de dire le contraire pour revenir à l'état initial : dire le contraire risque plutôt de conduire au discrédit de l'énonciateur... Néanmoins, sur le plan de la pensée du locuteur ou de l'interlocuteur, la construction ou reconstruction d'une schématisation en opérant sur le discours comprend des invariants - une "conservation" - qui permet des *inversions imaginaires*, comme celles que décrivent les travaux d'épistémologie génétique. Celles-ci sont encore largement à étudier, quand bien même les travaux de Grize et Piérault-Le Bonniec (1983) sur la contradiction fournit les prémisses de ce que peut bien recouvrir le concept de *conservation* et d'*opération inverse* en logique naturelle.

Les opérations logico-discursives de la logique naturelle représentent donc les *opérations concrètes* de transformation des *objets de discours*[251] au cours du processus de schématisation. Par conséquent, ces opérations sont toujours considérées comme opérées par un interlocuteur dans une situation d'interlocution spécifique[252]. La logique naturelle postule néanmoins que les opérations de pensée discursive disposent de caractéristiques générales, transversales aux situations et aux contenus de schématisations particulières.

Grize (1981) distingue trois niveaux[253] d'opérations :

— les opérations qui produisent et/ou transforment les *classes-objet* et les *prédicats* ;

— les opérations qui déterminent l'usage des *prédicats* et les appliquent à des *classes-objets* et et qui déterminent l'engagement énonciatif ou *prise en charge*, et peuvent occasionnellement déterminer également des *modalités* ou des *modulation* du prédicat utilisé ;

— les opérations qui procèdent à l'organisation et à la structuration (hiérarchique, séquentielle, logique) des *déterminés* et des *énoncés*, et qui est directement concernée avec ce que la langue courante désigne par la notion de "raisonnement".

Ces niveaux de la logique naturelle sont également présentés par Grize :

> *1er niveau. C'est celui des opérations constitutives des objets du discours, par quoi il faut entendre aussi bien les objets proprement dits (nos classes-objets) que les prédicats (nos classes-prédicats). Il correspond à la composante idéationnelle de Halliday, c'est-à-dire à ce dont il est traité ou encore à l'aspect cognitif de la schématisation.*
>
> *2e niveau. C'est celui des opérations de prise en charge par le locuteur des déterminations d'objet ou contenus de jugement. Il correspond à la composante interpersonnelle de Halliday. Sa complexité découle de ce que la logique naturelle, par contraste avec la logique mathématique, est*

251. L'organisation raisonnée incluse, c'est-à-dire que les transformations des *relations* que ces *objets de discours* entretiennent entre eux font parties intégrantes de ce que je désigne ici par "transformation", du fait que les *objets de discours* sont rétro-activement *définis* par les relations qu'ils entretiennent avec le reste de la schématisation.

252. Construite pour aborder la pensée à travers l'activité discursive, la logique naturelle restreint son champ d'investigation à de telles situations d'interlocution singulière. Néanmoins, le psychologue peut s'engager dans une recherche où de telles situations discursives prennent le sens de *traces* au sujet des processus de pensée des individus en situation, ce qui est notre cas lorsque nous nous donnons pour objectif d'étudier l'apprentissage à travers les interactions sociales des apprenants en situation. Cela sous-entend néanmoins d'accepter l'hypothèse que les activités discursives enregistrées constituent au moins partiellement l'activité d'apprentissage des élèves. Une telle hypothèse pourrait être étendue, sur la base de travaux établissant le lien entre activités interactives ou discursives et développement cognitif (par exemple dans la ligne de la théorie de Vygotsky, 1934/1986) pour permettre au chercheur de considérer qu'en étudiant une pensée discursive interindividuelle il étudie également certains processus de pensée intra-individuel du fait de l'intériorisation de cette pensée discursive. En outre, le logicien peut s'engager dans une recherche sur les caractéristiques communes aux opérations logico-discursives d'un certain type à travers les situations, comme le fait par exemple Miéville (1992) en s'intéressant spécifiquement à l'opération des organisations raisonnées τ, ou les caractéristiques communes de certaines structures linguistiques relativement à ces opérations : les publications de la revue *Travaux du centre de recherche sémiologiques* contiennent de nombreux exemples de ce type d'approche.(voir p.ex. : Apothéloz, 1997).

253. Concernant les "niveaux" au sein même des analyses que permet la logique naturelle, voir par exemple aussi Chavaz (1993) : il s'agit pour moi d'une prolongation de la réflexion épistémologique sur les *échelons* présentée au chapitre précédent, puisque je peux considérer ces "niveaux" comme une spécification supplémentaire de l'échelon auquel je travaille. Je tiens ici à relever la précision du travail d'explicitation que permet la logique naturelle quant aux échelons considérés au fil des analyses, grâce à ce système d'opérations logico-discursives d'une part, et grâce à la distinction entre ce qui relève d'une analyse du signe, de la communication puis, à un échelon beaucoup plus abstrait, de ce qui relève d'une théorie de la connaissance. Cette précision me sera très utile pour mes analyses des situations de malentendu.

> *essentiellement dialogique. Il permet de rendre compte du statut des énoncés : statut de constat, de fait, de thèse, de conséquence, d'hypothèse, de question, d'injonction. (...)*
>
> *3e niveau. Il correspond à la composante textuelle de Halliday, par où il entend ce qui a trait à la texture de la schématisation. Cette "texture" s'analyse pour nous en configurations et en composition de configurations. Elle résulte d'applications particulières des opérations élémentaires et de leurs enchaînements.*
>
> *(Grize, 1981, pp. 10-11)*[254]

Je vais à présent faire quelques commentaires pour chaque type d'opération, dans le but de clarifier mon usage de la logique naturelle dans cette recherche.

Grize (1996) nomme les opérations α *opérations d'ancrage*, dans le sens où ces opérations *ancrent* le discours dans les notions primitives. J'ai gardé la terminologie la plus récente, "sémantisation", qui a l'avantage de faire référence à une activité cognitive et linguistique permettant des liens avec les apports d'autres disciplines à la logique. Je distingue *sémantisation d'une classe-objet* et *sémantisation d'un couple prédicatif*.

Pour dénommer les opérations sur les classes-objet, Grize (1996) utilise l'objet sur lequel elle porte, par exemple *opération d'objet*, *opération sur les faisceaux*, ou *opération sur les domaines*. Vu mon usage peu précis de cette famille d'opération, je me limite à y faire référence en terme d'opération d'élaboration de la classe-objet, quelque que soit le type d'élaboration[255] dont il s'agit. J'inclus dans ces opérations d'*élaboration* d'une classe-objet ce que Grize décrit comme des *opérations sur les domaines* (ρ), du fait que celles-ci participent aussi à l'élaboration d'un objet de discours, à la construction d'une classe-objet.

J'ai repris les opérations d'extraction ι et ω de Grize (1996) avec la même terminologie. Ces opérations sont proches de celles de sémantisation, mais elles s'exercent sur des contenus du discours existant pour en extraire un nouvel objet de discours. Dans le cas de l'application d'une opération ι, l'objet de discours est présent dans la schématisation du locuteur sous la forme d'un prédicat, que l'opération d'extraction transforme en classe-objet. Cette transformation entraîne souvent des transformations du sens, qui justifie d'introduire une telle opération. Par exemple, $\pm se\ nourrir$ désigne une action à partir de laquelle le locuteur peut introduire {la nourriture} : les deux contenus seront liés au sein de la schématisation, et pourtant {la nourriture} introduit une nouvelle interprétation, peut-être des référents, avec lesquels le couple prédicatif $\pm se\ nourrir$ n'est pas *connecté* (au sens que prend connexion dans le modèle du signe, voir p. 194).

254. Le lien que Grize établit avec le cadre théorique de Halliday fait référence à l'ouvrage suivant : Halliday, M. A. K. (1978). *Language as social semiotic*. Londres : E. Arnold.

255. En effet, les explications de Grize quant à l'opération γ_1 où il donne l'exemple d'une *opération de partition*, et l'exemple d'une *opération de limitation de l'extension* de la classe-objet (opération γ_2) suggère que les opérations γ décrites dans l'ouvrage de 1996 pourraient être reprises dans ce sens et qualifiées selon la transformation qu'elles effectuent au niveau logique. Il faudrait y ajouter les opérations ρ que Grize (1996) décrit comme des opérations sur les domaines et qui permettent d'étendre les classes-objet à leur usage, voir d'analyser les métaphores. Cependant, la logique naturelle ne s'est pas arrêtée sur une liste exhaustive à ce niveau de détail. En outre, un tel niveau de détail n'est pas forcément nécessaire à l'identification de situation de malentendu, et je n'ai donc pas repris cette piste dans cette recherche. C'est néanmoins une possibilité intéressante pour une recherche visant à décrire plus précisément la diversité de ces opérations de construction des classes-objet au cours d'un processus d'apprentissage dans et par les interactions verbales.

L'opération d'extraction à partir d'un déterminé, d'un énoncé ou d'un configuré (ω) est intéressante en ce qu'elle condense la signification élaborée dans la schématisation en introduisant un nouvel objet de discours dans la schématisation à partir d'un ensemble déjà schématisé. L'efficacité de ce procédé pour se référer à des contenus complexes est à l'origine de l'introduction de nombreuses notions et concepts, et nous intéresse particulièrement du point de vue théorique en tant que processus de conceptualisation par le discours. C'est une opération de pensée qui synthétise une partie de la schématisation en lui donnant un statut d'*objet de discours*. En ce sens, elle est proche d'une *définition* (au sens philosophique), mais fonctionne dans l'ordre inverse[256] de la définition formelle ou écrite : le contenu est d'abord schématisé, puis un nouvel objet de discours est extrait à partir de cette schématisation ou d'une partie de celle-ci. Une conséquence de cette inversion du processus est de ne pas délimiter clairement ce qui est inclus du discours précédent dans le nouvel objet, même s'il est clair que ce nouvel objet se réfère à ce discours. Par exemple, l'enseignant peut expliquer le concept de *force* pendant de nombreuses minutes dans une schématisation riche et complexe, puis déclarer : "c'est cela qu'on entend par force en physique". Quelle est exactement la partie du discours qui définit le nouvel objet de discours ? Si l'on considère que c'est l'ensemble, peut-on pour autant considérer que toutes les parties de cet ensemble sont aussi importantes l'une que l'autre pour définir le sens de ce nouvel objet ? Il y a là un processus logico-discursif qui permet d'élucider certaines difficultés d'interprétation.

Afin de distinguer l'opération de son produit, j'ai choisi de nommer le résultat d'une opération de *détermination* un *déterminé*, de manière analogue au terme *énoncé* désignant le résultat d'une *énonciation*.

La polyopération σ que Grize nomme "opération de prise en charge" comprend certes une *opération de prise en charge énonciative*, mais aussi la détermination temporelle du couple prédicatif (ce que les grammairiens appellent la *conjugaison*) qui permet de situer cette énonciation dans le temps, et une éventuelle *modalisation* de la prise en charge qui peut par exemple l'affaiblir, comme dans "Il a *peut-être* neigé". Dès lors, je propose de nommer la polyopération σ *énonciation* et de réserver le concept de *prise en charge* pour ce qui est relatif à l'attribution d'une voix qui prend en charge les propos des autres effets de cette opération, comme l'usage d'un temps verbal, de la *modalisation* et de la *modulation*. À ce sujet, il convient de mentionner la différence que fait (Grize, 1996) entre les temps verbaux utilisés dans l'opération d'*énonciation* et une autre opération, l'opération de *localisation* λ. Cette dernière opère sur un *déterminé* : du point de vue logique et cognitif, cette distinction est nécessaire compte tenu des règles grammaticales spécifiques aux langues utilisées qui ne permettent pas de confondre usage des temps du verbe avec une localisation temporelle, cette dernière pouvant par ailleurs se révéler beaucoup plus précise, selon les cas, comme dans "hier, il faisait beau" (l'opération λ permet de rendre compte de la localisation dans le temps, "hier", la polyopération σ ne nous permettant, au mieux, que de déterminer que cela se passe dans le passé).

Pour l'opération d'*organisation raisonnée* τ (Grize & de Montmollin, 2008), que Grize (1996) nomme aussi *configuration*, j'ai gardé les deux usages, car le plus ancien m'a permis d'introduire un nouveau terme pour le produit de l'opération, de manière analogue aux *énoncés* et *déterminés* : le *configuré*. Il n'est pas

256. Comme c'est souvent le cas pour le raisonnement naturel, Grize (1996) en donne d'autres exemples.

inutile de faire quelques commentaires sur ces *configurés*, qui représentent la structure d'une schématisation en logique naturelle. Tout d'abord, il convient de préciser un point particulièrement important pour notre recherche : l'*organisation raisonnée* est une opération qui construit les liens et les articulations entre les éléments de la schématisation, mais ce qui est remarquable c'est que ces liens peuvent s'établir à trois niveaux différents, c'est-à-dire entre *déterminés*, entre *énoncés* et entre *configurés*[257]. Ces structures peuvent être hiérarchiques (voir par exemple les structures interlocutoires mise en évidence par : Trognon, 1995) ou "logiques" au sens très ouvert de la logique naturelle : relation de subséquence, d'analogie, etc.

La flèche simple "$\Rightarrow$" est introduite dans mes conventions de notation pour représenter le lien établi par une opération τ, la direction de la flèche permettant d'indiquer la direction du déroulement du discours, sa séquentialité. Cette flèche simple est surmontée d'une spécification du lien établi, à partir des mots utilisés par le locuteur, s'il y en a.

Par ailleurs, la structure qu'établit une opération d'*organisation raisonnée* ne suit pas forcément la séquentialité du discours de manière linéaire : notamment en raison des liens sémantiques que peuvent entretenir des déterminés, des énoncés ou d'autres *configurés* entre eux, l'*organisation raisonnée* peut établir des liens entre eux indépendamment de leur proximité dans la séquentialité du discours. C'est une conséquence d'un logique non-formelle, qui continue de prendre en compte les contenus même au moment d'analyser la structure logique du discours. Cependant, la proximité de deux *déterminés*, *énoncés* et *configurés* dans la séquentialité du discours fournit évidemment un indice des relations qu'établit une opération d'*organisation raisonnée*. Ce n'est cependant pas le seul indice, et l'ensemble de la situation d'interlocution peut concourir à l'intelligibilité d'un *configuré*.

Pour donner une image de cette ouverture de sa sémiologie, Grize (1996) prend l'exemple d'une bande-dessinée, où le lecteur infère une organisation raisonnée entre les images selon leur disposition spatiale sur la feuille, plutôt de gauche à droite puis de haut en bas en occident, mais de droite à gauche puis de haut en bas pour les mangas japonais. Il apparaît clairement combien nous sommes loin ici des structures logiques modélisées par la logique formelle, en particulier du fait que la structure d'une organisation raisonnée - très souvent implicite - peut être plus ou moins déterminée[258] et plus ou moins dépendante de préconstruits culturels (comme pour la lecture des bandes-dessinées).

Afin de représenter les hiérarchies construites par une opération d'*organisation raisonnée*, et en particulier la manière dont la *prise en charge* est incluse ou non dans l'opération, j'ai ajouté une convention de

257. Ce point est particulièrement utile à l'analyse du raisonnement des apprenants qui s'engagent dans des *discours exploratoires* (Mercer, 1995) qu'il est difficile d'analyser comme une argumentation où l'élève défendrait son point de vue propre dans le but de convaincre (Breux & Perret-Clermont, 2014), du fait que le contenu (le *déterminé* dans la logique naturelle) n'est pas forcément pris en charge par les apprenants - ou seulement plus tard - puisqu'il est en cours d'appropriation. Ce problème n'est d'ailleurs pas sans rappeler l'un des enjeux soulevés par la littérature sur les conceptions des élèves : un élève peut se trouver dans la situation de fournir la réponse attendue à un moment donné, mais néanmoins utiliser plus tard une autre forme de raisonnement ou énoncer un autre avis. Comme dans le développement cognitif, il y a dans les usages des discours un *espace de jeu* où l'apprenant essaie des *énonciations*, sans forcément y *adhérer* au moment où il le fait.

258. En effet, le lien entre deux énoncés ou déterminés établi lors d'une configuration n'a pas seulement une certaine qualité (lien de conséquence, de subséquence, etc.) mais il est également plus ou moins "serré", c'est-à-dire précis, spécifique, déterminé ou contraignant, selon s'il est explicite ou non, et selon la manière dont il marqué dans le discours.

notation à celle utilisée par Grize, inspiré du format utilisé en mathématiques pour les fractions, qui permet de représenter un rapport (entre le numérateur et le dénominateur en mathématiques). Cette notation permet de différencier les opérations d'*organisation raisonnée* portant sur des *déterminés* de celles portant sur des *énoncés* ou des *configurés*, combinant les divers cas de figure possibles dans un seul système de notation.

Voici un exemple de cette nouvelle convention de notation :Imaginons une situation où A dit à B : "Je t'aime parce que tu m'a dis que tu m'aimes". Il y a dans l'opération d'organisation raisonnée une ambiguïté. Autrement dit, cette déclaration peut se comprendre de deux manières selon que l'*organisation raisonnée* porte, précisément, sur les déterminés ou sur les énoncés. Dans un cas comme celui-ci, ce qui m'intéresse c'est de pouvoir distinguer par le métalangage de la logique naturelle les diverses possibilités et de pouvoir les exprimer. Avec la notation en fraction, je peux écrire quatre acceptions différentes de la phrase du locuteur A :

1. $\frac{Je\,dire}{(-que\,moi\,aimer\,toi)} \xrightarrow{parce\ que} \frac{tu\,dire}{(-que\,toi\,aimer\,moi)}$
2. $\frac{Je\,dire}{(-que\,moi\,aimer\,toi)} \xrightarrow{parce\ que}$ (– que toi aimer moi)
3. (– que moi aimer toi) $\xrightarrow{parce\ que}$ (– que toi aimer moi)
4. (– que moi aimer toi) $\xrightarrow{parce\ que} \frac{tu\,dire}{(-que\,toi\,aimer\,moi)}$

La notation de la première ligne, le premier cas de figure, décrit une schématisation où A déclare son amour à B parce que B a déclaré le sien à A. Le deuxième cas de figure décrit une schématisation où A déclare son amour à B du fait - peu importe ici que A le présume, le sache, le devine, etc. - que B aime A. Dans les troisième et quatrième cas de figure, l'*organisation raisonnée* $\xrightarrow{parce\ que}$ ne porte plus sur les raisons de la déclaration d'amour, mais du sentiment amoureux que A porte à B : tantôt le fait d'être aimé par B, tantôt le fait d'avoir entendu la déclaration d'amour que B a faite à A. Dans cet exemple un peu simple, du fait qu'il ne prend en compte que les possibilités d'*organisation raisonnée* portant soit sur les *déterminés* soit sur les *énoncés*, le configuré présente déjà quatre interprétations possibles différentes.

* * *

Muni de ces outils, je pourrai coordonner, lors des analyses des situations de malentendu, les apports des approches évoquées en amont dans ce chapitre, de manière transversale aux échelons choisis pour cette recherche, et de manière transdisciplinaire en établissant le lien entre ces échelons et entre les apports des sciences du langage et de la communication, de la psychologie cognitive, sociale et historico-culturelle, et de l'épistémologie génétique sur la base du métalangage de la logique naturelle, et de la sémiologie et de la théorie de la communication que Grize lui a donné pour cadre. Le schéma de la figure 3.8 ci-dessous présente une image - très approximative - de cette coordination.

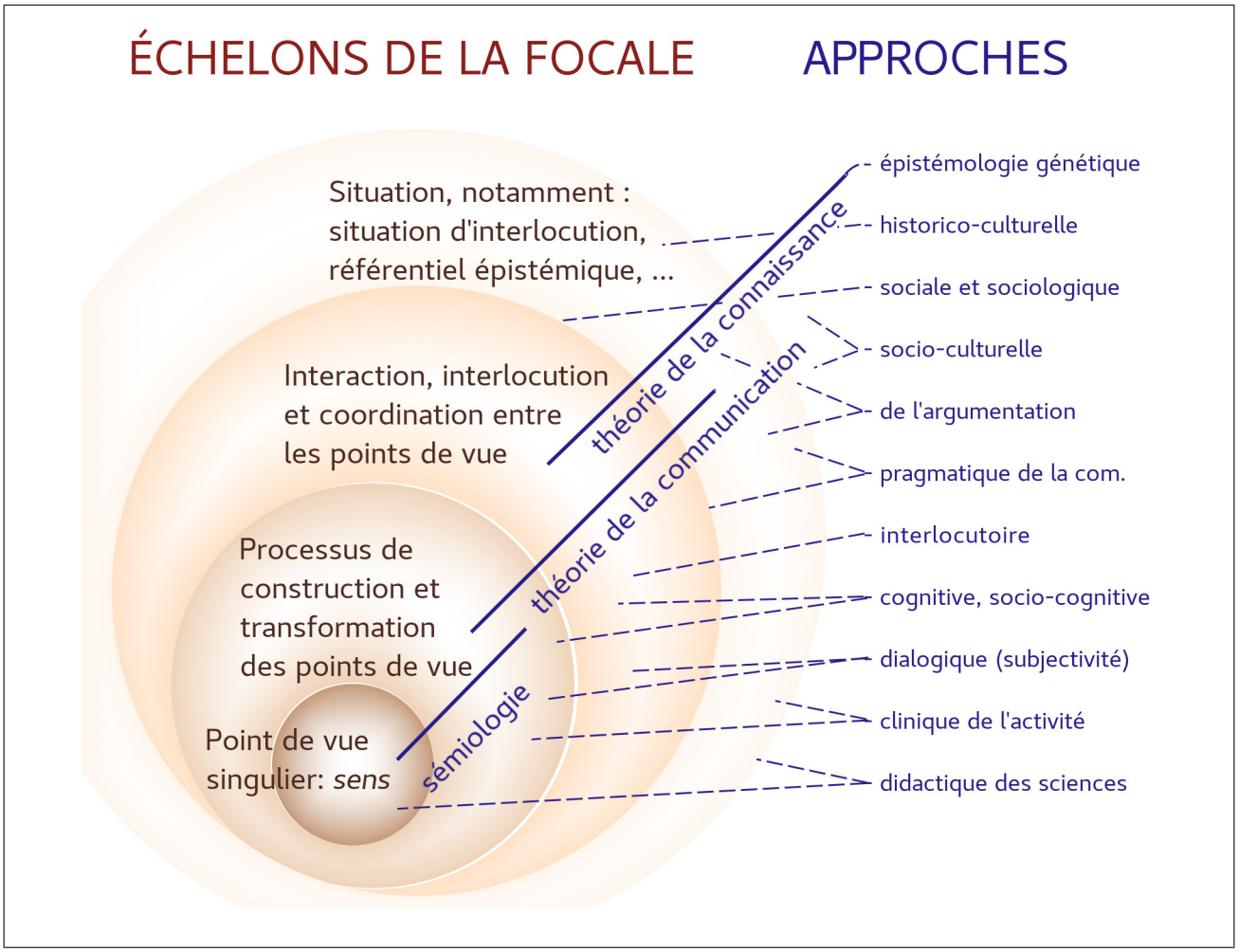


FIGURE 3.8 – Schéma approximatif de la coordination des approches dans la perspective adoptée pour cette recherche, sur les quatre échelons choisis.

Ce schéma approximatif a surtout pour objectif de récapituler le croisement entre quatre échelons choisis pour la focale de cette recherche sur les situations de malentendu, avec les apports des approches de l'apprentissage évoqués dans ce chapitre, en soulignant le rôle transversal de la sémiologie, de la théorie de la communication et de la théorie de la connaissance de Grize pour coordonner l'ensemble dans et par les analyses, au chapitre 6.

3.4 Question de recherche et opérationnalisation

Comment expliquer les difficultés rencontrées par les élèves dans l'apprentissage de la physique newtonienne en milieu scolaire en prenant en compte les processus cognitifs mobilisés par les élèves en situation, et les processus communicationnels, sociaux et culturels ?

À cette question de recherche s'ajoute des hypothèses quant à la pertinence de la perspective adoptée pour cette recherche. Ces hypothèses, construite au cours de la problématisation de ce chapitre et des précédents, énoncent divers aspects du *pari intellectuel*[259] qui consiste à aborder les processus d'apprentissage.

La première hypothèse porte sur la potentialité d'une explication du phénomène des préconceptions (misconceptions en anglais) par des processus communicationnels plutôt qu'en attribuant les écarts des réponses des élèves aux savoirs à enseigner à une pensée individuelle endogène. Les chercheurs étant eux-même tributaires de ces processus communicationnels pour construire leur point de vue sur l'apprentissage des élèves, je considérerai que l'explication par des processus communicationnels l'emporte sur celle qui consiste à induire des conceptions individuelles à partir du moment où elle permet de rendre compte des traces observées en faisant l'économie de la référence à des conceptions individuelles.

Au chapitre 2 (voir p. 77), j'ai énoncé cette hypothèse ainsi :

1ère hypothèse : *la cohérence et la stabilité du phénomène des conceptions s'explique à l'échelon de la situation, au sens où le chercheur peut en décrire la genèse relativement aux processus de communication, aux contraintes de la tâche et en particulier de la consigne, de telle sorte qu'attribuer des conceptions aux individus devienne superflu.*

La deuxième hypothèse de ce *pari* consiste en l'identification et description de situations de malentendu qui ne sont pas repérées par les interlocuteurs sur le moment : si cette hypothèse peut paraître confirmée par avance au lecteur, il s'agit là d'une illusion rétrospective, car malgré le travail théorique de problématisation et de coordination des approches effectué, la démarche pourrait se révéler impraticable au moment du travail empirique. Cette hypothèse peut s'énoncer ainsi :

2ème hypothèse : *le choix des échelons et des approches de l'apprentissage pour constituer la perspective de cette recherche permet d'identifier et de décrire des situations de malentendu, en construisant un point de vue de chercheur qui rétablit la cohérence des points de vue des interlocuteurs dont les traces sont analysées, c'est-à-dire sans devoir se reposer sur les traces d'un processus de réparation des malentendus par les interlocuteurs concernés.*

Une troisième hypothèse, justifiant le fait même de faire ce *pari*, consiste à croire que cette recherche permet d'apporter un nouvel éclairage sur les processus d'apprentissage, en particulier du fait de la co-

259. La référence à Blaise Pascal est un hommage à cet auteur qui m'a fait découvrir, et aimer, le raisonnement scientifique.

ordination de multiples approches dans une perspective intégrée et articulée autour du choix d'échelons d'observation spécifiquement sélectionnés pour une focale adéquate à l'étude des processus d'apprentissage, et de la prise en compte différenciée des points de vue, y compris le point de vue du chercheur [260]. Cette troisième hypothèse peut s'énoncer ainsi :

3ème hypothèse : *la focalisation sur les situations de malentendu d'une perspective transdisciplinaire qui coordonnent plusieurs approches des processus d'apprentissage permet un nouvel éclairage quant à l'apprentissage des élèves en milieu scolaire, qui met en évidence le déroulement des processus, des enjeux et permet de rendre intelligible les difficultés que les élèves rencontrent dans leurs activités de didactique des sciences.*

Je discuterai la question de recherche et ces hypothèses au chapitre 7, section 7.1, p. 675 et suivantes), sur la base des résultats présentés au chapitre 6.

Avant de présenter la partie empirique de la recherche, il reste cependant à définir précisément ce que j'entends par *situation de malentendu*.

3.4.1 Vers une définition des *situations*

Nous avons vu au chapitre 2 (section 2.3.2.7, p. 88 et suivantes) la nécessité de définir *situation*, pour la focalisation de cette recherche sur des *situations de malentendu*. Or, cette définition doit être cohérente avec la perspective sur l'apprentissage utilisée pour la recherche, et pour laquelle nous venons de parcourir plusieurs approches qui permettent d'aborder les processus d'apprentissage dans leur complexité, et de les étudier comme des phénomènes situés et singuliers. Nous sommes dès lors en mesure de discuter du problème de la définition des *situations*.

Pour mes propos, j'ai utilisé jusque là le terme *situation* dans des usages qui désignent plus spécifiquement un aspect de la *situation* en général, par exemple en faisant usage du concept de *situation d'interlocution* de Grize (1996), de *situation didactique* de Brousseau (1998/2004), ou encore de la *situation associée à un schème* (Vergnaud, 1985). Chacun de ces concepts a sa propre définition. Néanmoins, pour pouvoir les mobiliser dans une perspective intégrative où je m'intéresse aux *situations de malentendu* - un sous-ensemble des *situations* en général - j'ai besoin d'un concept de *situation* qui fonctionne également comme référence générale aux *situations plus spécifiques* que désignent les auteurs précités.

En outre, j'ai plusieurs fois mentionné l'échelon situationnel, désignant par là un degré dans l'échelle des phénomènes : il me faut donc une définition de situation qui permet de la considérer tantôt comme un *phénomène*, tantôt comme partie prenant d'un *point de vue* - par exemple la *situation didactique* de Brous-

260. La coordination de ce point de vue avec ceux étudiés est rendue possible, au lecteur, par l'explicitation d'une théorie de la connaissance et de choix épistémologiques utilisés à la fois pour rendre compte des résultats de la recherche et de l'activité de théorisation du chercheur, ce que permet l'épistémologie perspectiviste (voir plus haut et pour l'argumentation : Giere, 2006).

seau fait toujours "situation" *pour quelqu'un*, et peut être "didactique" pour un élève, et "adidactique" pour un autre.

L'usage que j'ai fait de l'adjectif *situé* jusqu'ici n'introduit pas de nouvelles contraintes à la définition : il fait simplement référence à l'*inclusion dans une situation*, et renvoie donc le problème de sa signification précise à la définition du concept de *situation*.

de Fornel et Quéré (1999) [261] propose une discussion du concept de *situation* dans la littérature, au fil des courants historiques, qui permet de se faire une idée des diverses options pour la définition de ce concept difficile. Les auteurs soulignent une première difficulté de cette définition en reprenant une critique de Dewey :

> *Dewey soulignait qu'un organisme ne vit pas* dans *un environnement, mais* "par le moyen d'*un environnement" avec lequel il est en transaction, et que les activités dans lesquelles l'enquête prend place sont produites autant par celui-ci que par les organismes ou les agent qui les mènent.*
>
> *(de Fornel & Quéré, 1999, pp. 8-9)*

Cette première difficulté concerne, selon les auteurs, "le rôle de médiation joué par l'environnement et par la situation dans la réalisation des activités dites "situées"." (*idem,* p. 8). Goffman (1964) discute ce problème quand il remet au centre de l'attention la situation [262], et sa définition met en évidence les "possibilités de contrôle" (*idem,* p. 9) des individus qui y sont présents. Selon Goffman, "une situation sociale se produit dès que deux ou plusieurs individus se trouvent en présence mutuelle immédiate" (idem).

Une seconde difficulté porte sur la délimitation [263] d'une situation (voir p.ex. : Berger & Luckmann, 1966) : si la situation est une "portion de l'environnement", comment délimite-t-on cette "portion" ? En effet, il a été reproché à la définition de Dewey, notamment, que "la" situation comprenait l'ensemble de l'univers. Dès lors que la situation est définir comme une "portion", ou un "ensemble", la question de ses limites se pose.

Cependant, cette question se pose *relativement à un point de vue* : ce qui *fait situation* n'est pas forcément délimité de manière identique d'une personne à l'autre, quand bien même ces personnes sont présentes à la même *situation* - on remarquera que dans mon dernier usage de *situation*, c'est d'un point de vue externe à la *situation* que j'y fais référence. Il faut donc également une définition qui puisse inclure ce "point de vue externe", ce que j'ai appelé jusque là *la situation en tant que phénomène*, et considéré à un certain échelon ajouterais-je encore.

261. Je remercie encore vivement François Gremion de m'avoir indiqué cet ouvrage, et de m'avoir mis sur la piste des travaux de Dewey.
262. Goffman a beaucoup écrit pour que les chercheurs donnent à "la situation" l'attention qu'elle mérite dans leur recherche, c'est-à-dire à ce qu'ils incluent dans la focale de leur perspective l'*échelon situationnel*, selon le vocabulaire que j'ai introduit plus haut pour éviter de confondre les phénomènes avec leurs interprétations par les chercheurs.
263. Le mot "définition" est parfois utilisé dans la littérature, dans une expression comme "définir une situation", mais j'y préférerai ici le terme *délimitation* pour éviter la confusion avec *définition* au sens de "donner une définition du concept *situation*".

La définition de situation de Dewey (1938/1993) permet de répondre aux contraintes ci-dessus [264] Dewey (1938/1993) distingue la *situation indéterminée* (p. 35), celle qui interpelle et "provoque l'enquête" (*ibidem*), de la *situation déterminée* [265] à laquelle aboutit l'enquête de Dewey (1938/1993), ce que j'appellerais dans mon cadre théorique *la construction d'un point de vue sur la situation*.

Cette distinction permet de préciser nos propos :

1. La *situation indéterminée* est un phénomène, part d'un milieu ou environnement mais aussi événement, car elle est situation temporelle autant que sociale, géographique, etc. et, à ce titre, elle participe du monde objectif : j'utiliserai ce concept de situation indéterminée pour théoriser la situation en tant qu'échelon d'observation, car en tant que situation indéterminée je m'y réfère avant que ou indépendamment de la connaissance que les personnes impliquées en ont, et des éventuels savoirs scientifiques construits à son sujet.
2. La *situation déterminée* a, quant à elle, été *déterminée* d'*une certaine manière* et d'*un certain point de vue*, au cours d'un processus de qualification, qui permet d'en faire une situation d'un certain type, que ce soit par reconnaissance d'une classe de *situations* semblables (comme pour les *situations spécifiques à un schème* citées plus haut), en fonction des habitudes des personnes dont c'est le point de vue, ou selon des critères dans une enquête permettant de construire des savoirs scientifiques (les *assertions garanties* de Dewey), comme je le propose ici en introduisant le concept de *situation de malentendu* : pour être déterminée comme une *situation de malentendu*, je mènerai une enquête permettant de vérifier si la *situation indéterminée* est de type *situation de malentendu*, à l'aide des critères choisis à cet effet.

de Fornel et Quéré (1999) souligne la dimension dynamique de la *situation* chez Dewey :

> *... Dewey (1934, 1993) insistait à la fois sur le caractère de totalité, structurée et orientée, de la situation, sur sa nature événementielle, sur son individualité, sur sa teneur qualitative, sur son pouvoir de qualification et d'imprégnation de ses éléments constitutifs, mais aussi sur sa structure dramatique (qui n'est pas d'emblée narrative). En un sens, une situation dynamique émerge lorsqu'une intrigue se noue à la faveur d'un événement, d'une initiative ou d'un concours de circonstances, et elle se résout lorsqu'un dénouement se produit.*
>
> *(de Fornel & Quéré, 1999, p. 21)*

264. Les autres approches discutées par de Fornel et Quéré (1999), plus récentes, ne répondent pas aux exigences que pose cette recherche : la "sémantique des situations" (*idem,* p. 19) par exemple, considèrent que "les significations sont dans le monde" (*ibidem*), un postulat auquel je ne peux pas souscrire compte tenu des approches retenues pour la perspective de cette recherche, et compte tenu de l'épistémologie perspectiviste qui permet de coordonner l'ensemble. En outre, la sémantique des situations repose sur la théorie de l'information, dont j'ai discuté les limites à plusieurs reprises pour aborder le phénomène de l'apprentissage. Plus généralement, c'est la singularité qui m'intéresse dans la *situation*, comme c'était le cas pour Dewey ("la singularité est ce sur quoi pivote l'enquête portant sur une situation individuelle", cité par de Fornel & Quéré, 1999, p. 23), et non la généralisation à travers une démarche formalisante.

265. Pour Dewey, il s'agit du résultat de *l'enquête* - c'est-à-dire d'un processus de connaissance - qui conduit à reconnaître dans une situation singulière des situations qui se sont répétées, autrement dit une *situation spécifique*, d'un certain type, comme dans les exemples que j'ai pris ci-dessus de *situation didactique*, *situation de malentendu*, etc.

Au vu de ce qui précède, en particulier de la discussion sur l'importance d'une approche dynamique en logique naturelle et dans les approches du processus d'apprentissage évoquées, cet aspect m'intéresse tout particulièrement, et rend possible l'articulation d'une démarche empirique en deux temps : premièrement par l'identification d'un *événement* (que je choisirai parmi les *incidents critiques* au cours des activités de didactique des sciences de la classe étudiée - et deuxièmement par l'analyse de la *situation indéterminée* ainsi identifiée, pour discuter sa détermination en tant que *situation de malentendu*.

Cette définition du concept de *situation*, qui en différencie deux moments - la *situation indéterminée* et la *situation déterminée* - permet de reformuler la tâche sur laquelle repose l'évaluation des hypothèses de cette recherche : l'analyse de *situations de malentendu* permet-elle le dénouement des situations indéterminées, nouées à l'occasion d'incidents critiques au cours des activités en classe de physique ?

Je m'appuie encore sur la conclusion de de Fornel et Quéré (1999), quant aux conceptualisations possibles de la situation, pour préciser ma position parmi la liste proposée par les auteurs en synthèse de leur analyse de la littérature :

> *Plusieurs stratégies s'offrent ainsi pour conceptualiser la situation, et situer l'activité et la cognition, ainsi que pour rendre compte du couplage entre environnement et comportement, situation et conduite. On peut donc remédier au caractère négligé de la situation de multiples façons, qui ne sont d'ailleurs pas nécessairement opposées :*
>
> *[1] - en attribuant aux agents l'occupation d'un "point de vue de quelque part" et en tenant compte des modalités effectives de leur accès au monde (à eux-mêmes et à ce qu'ils font ? lorsqu'ils agissent, pensent, raisonnent, etc.) ; [2] - en remettant dans l'environnement ce qui en avait été indûment enlevé pour l'attribuer à l'esprit ou au sujet, à commencer par les significations et les valeurs ; [3] - en redonnant à la perception directe du milieu sa place centrale dans la jonction de la sensibilité et de la signification, et donc en réhabilitant, face à la réflexion, au raisonnement et à l'interprétation, sa contribution au réglage du comportement ; [4] - en radicalisant la dépendance de la pensée et du langage, de la perception et de la compréhension, par rapport au contexte, et en généralisant le phénomène de l'indexicalité ; [5] - en restituant à la cognition son véritable environnement, constitué à la fois de systèmes culturels d'activité et de réseaux d'objets, d'outils et d'artefacts qui prennent en charge une part des opérations cognitives et du contrôle requis par l'organisation des activités ; [6] - en substituant à l'action planifiée rationnelle des pratiques articulées sur les contingences et les circonstances, et reposant sur l'improvisation et la phronèsis, sur l'habileté corporelle et le sens de l'opportunité ; [7] - en rapportant la dynamique des situations, qui sont les champs où s'organise nécessairement l'expérience, d'une part à leur structure temporelle et dramatique, d'autre part à leur appartenance à la totalité supérieure formée par un organisme et son milieu, totalité soumise à des tensions, des incompatibilités, des déséquilibres, des transactions.*
>
> *(de Fornel & Quéré, 1999, p. 29)*

Pour pouvoir m'y référer facilement, j'ai numéroté les "stratégies" listées par les auteurs ci-dessus. Je reprends dans ma définition de situation tous les points, à l'exception du deuxième : je ne pense pas qu'il soit nécessaire de souscrire à une affirmation ontologique comme celle-ci, et je suis plutôt d'avis qu'elle procède d'une part de la confusion entre *signification* et *information*, au sens où je les ai défini en amont,

et d'autre part d'une alternative rigide entre des "significations dans le monde" et des "signification dans l'esprit (le sujet)". Or, j'ai tenté d'argumenter à maintes reprises l'importance de considérer la pertinence de l'épistémologie génétique sur ce point : ces "significations" procèdent de l'*interaction* ou *relation* entre le sujet et son milieu, possibilité que les auteurs ne semblent pas examiner. En outre, aucun argument n'est donné qui défend cette idée que les significations ont été "indûment" enlevées de l'environnement, et je dispose par contre de nombreux arguments en épistémologie et en psychologie pour considérer que la construction des significations - et des valeurs - est effectuée par des personnes situées, et que ces significations ne se *trouvent* pas dans les situations[266].

Enfin, le point #6 que soulignent les auteurs me paraît particulièrement intéressant : au lieu de concevoir le sujet en interaction avec la situation comme un sujet planifiant "rationnellement" ses actions, celles-ci procèdent plutôt des potentialités qu'a le sujet et de son opportunisme, une forme de rationalité qui ne se décrit et s'explique par le chercheur qu'*après coup*, comme la psychologie génétique la d'ailleurs montré dans ses travaux sur le développement cognitif.

Il me reste à définir les critères permettant de considérer, après enquête, si une *situation indéterminée* est *situation de malentendu*, de mon point de vue de chercheur.

3.4.2 Définition des *situations de malentendu*

3.4.2.1 Critères pour déterminer des *situations de malentendu*

Dans le but de *déterminer* une *situation* comme *situation de malentendu*, mes analyses me permettent surtout de considérer la *situation d'interlocution*, puisqu'elles se font à partir des traces discursives à disposition. Partant d'une reconstruction des points de vue à l'aide de la logique naturelle, j'examinerai au cours de l'enquête la *situation* en tant que *système de relations entre ces points de vue*. Ce n'est donc pas la délimitation de la *situation dynamique* en tant que telle qui me permettra de la déterminer en tant que *situation de malentendu*, de mon point de vue de chercheur, mais les relations qu'entretiennent entre eux les points de vue des élèves et enseignants participant à cette situation, reconstitués par la perspective adoptée pour cette recherche et explicitée dans ces premiers chapitres.

Si ces relations répondent aux trois critères[267] ci-dessous, je considérerai qu'il y a *situation de malentendu* :

1. Il y a parmi les schématisations des élèves (construites individuellement ou collectivement) et de l'enseignant (y compris celles présentées dans les manuels, feuilles d'exercices, etc.) des schématisa-

266. À mon avis, l'approche écologique de Gibson (1977) ne place pas non plus ces éléments dans l'environnement, mais tente de décrire avec beaucoup de subtilité l'évocation de celles-ci *pour un sujet donné* au moment des *affordances* ; cette théorie me semble néanmoins fréquemment conduire à des simplifications qui place effectivement les significations dans l'environnement lui-même, comme si une chaise, par exemple, *signifiait* s'asseoir.

267. J'ai tenté, en procédant ainsi, de répondre au besoin d'une *critérologie* qu'argumente Dewey (1938/1993), par soucis de cohérence avec la définition de *situation* que je reprends au même auteur.

tions construites et/ou reprises dans la *situation indéterminée* étudiée qui portent sur des *objets de discours* ou des *référents* faisant l'objet d'une *attention conjointe* par les participants à la situation, qui permet d'établir un sujet de conversation commun, et pour lesquelles les activités des participants s'orientent vers le partage d'une vision commune, dans cette *situation*, c'est-à-dire que les interlocuteurs travaillent au minimum à *accepter* une schématisation commune, voire cherchent à y *adhérer*.

2. L'analyse permet d'identifier dans les schématisations choisies selon le premier critère, une partie commune à l'ensemble des interlocuteurs, c'est-à-dire une schématisation qui est *au moins à un moment donné* coconstruite. Par exemple, le chercheur peut identifier la reprise d'un objet de discours par tous les interlocuteurs, ou des opérations logico-discursives communes entre élèves et enseignant.

3. L'analyse permet d'identifier dans les schématisations choisies selon le premier critère au moins une *divergence* ou, d'une manière plus générale, quelque aspect selon lequel les schématisations diffèrent *à au moins un moment donné* de leur construction, par exemple sous la forme de *finalités* ou *d'éclairages* différents.

Le premier critère est habituellement rempli en milieu scolaire : élèves et enseignants se trouvent dans une situation dont l'objectif, surdéterminée par le cadre institutionnel, consiste justement à partager des schématisations communes sur les savoirs à enseigner. Elle nous rend cependant attentif au fait que ce sont ces schématisations-là qui seront déterminantes pour considérer qu'il y a ou non situation de malentendu, et non par exemple le narratif d'un élève de ce qu'il a fait pendant ses vacances, sur lequel il n'y a pas de finalité de partage avec l'enseignant d'une vision commune, ni même d'attention conjointe (si tout se passe bien pour l'élève). Ce critère permet de disqualifier toute enquête quant à une *situation de malentendu* dans les cas où les interlocuteurs ne cherchent pas à se comprendre et à construire une intersubjectivité [268], par exemple dans une joute verbale dont l'objectif général consisterait à faire perdre la face à son opposant. Dans des cas de ce genre, je considère que nous n'avons plus affaire au même phénomène et que d'autres outils sont nécessaires.

Le critère #2 devrait permettre de faire la distinction, au moins du point de vue théorique, entre *situations de malentendu* et une situation où l'élève ne répond pas aux exigences scolaires en raison de *préconceptions*, d'une *représentation* de la physique *antérieure* à l'instruction scolaire. Ce critère permet de disqualifier une situation où les interlocuteurs schématisent indépendamment les uns des autres et dont il paraît alors plus pertinent de faire l'hypothèse que leur schématisation procède alors de leurs *représentations* individuelles sur le sujet de conversation, plutôt que du processus communicatif lui-même. Par contre, dès lors que les schématisations comprennent des reprise par les élèves de la schématisation de l'enseignant, il devient possible de déterminer la *situation* comme *de malentendu* : les *divergences* que l'analyse met alors

268. Cette propension ou bonne volonté à comprendre autrui n'est évidemment pas directement observable, et la *reprise* du discours d'un interlocuteur par un autre me paraît le meilleur indice (pour l'argumentaire sur le rôle du troisième tour de parole, voir p. ex. : Trognon, 2001) pour l'établir empiriquement, même si dans cette recherche c'est surtout les objectifs institutionnels d'enseignement et d'apprentissage qui permettent de considérer, dans les situations indéterminés analysées, que cette condition est remplie.

en évidence peuvent éventuellement prendre leur origine dans le processus de communication lui-même. Dans ce cas, il n'est plus possible d'attribuer directement à un élève une représentation correspondante à la schématisation qu'il a produite, puisque cela reviendrait à ne considérer la communication uniquement comme l'expression de structures cognitives individuelles, alors qu'elle est en même temps un processus de pensée discursive permettant justement aux élèves de *construire* ces structures et, plus généralement, de s'approprier les savoirs enseignés, d'*apprendre* dans et par l'interaction sociale.

Le critère #3 nécessite une discussion permettant d'être plus précis sur ce qui constitue les éventuelles *divergences*.

3.4.2.2 Définition de la divergence

Nous disposons de quoi reconstruire les schématisations des élèves, en tant qu'actions organisatrices d'un discours dont la logique naturelle nous permet de mener des enquêtes sur le contenu et la forme logique singulière, et de quoi reconstruire la schématisation du point de vue institutionnalisé de l'enseignant, disposant des mêmes caractéristiques et permettant ainsi une comparaison. Il nous faut encore une définition de la divergence entre ces schématisations.

Grize et Piérault-Le Bonniec (1983) en fournissent une définition dans leur ouvrage sur la contradiction [269], basée sur les concept de *témoin* (T) et de *siège* (S) ou *lieu* de la contradiction. Le *témoin* est nécessaire dans une logique de l'action : constater une contradiction ou une divergence est aussi l'acte d'un interlocuteur. Le siège permet de localiser la ou les schématisations en contradiction. Les auteurs formalisent ainsi la définition de la *divergence* :

> *Quand l'auteur n'explicite pas la raison pour laquelle il met en parallèle S et $S*$ c'est qu'il les considère comme suffisamment ancrés dans un préconstruit culturel, situationnel ou contextuel pour que leur conjonction aille de soi.*
>
> *Quoi qu'il en soit, nous appellerons* divergences *les séquences discursives de la forme générale :*
>
> $$\begin{array}{ll} & S\ .\ — \\ T\ : & \\ & S^*\ .\ — \end{array}$$
>
> *(Grize & Piérault-Le Bonniec, 1983, p. 35)*

Les barres horizontales remplacent ici un contenu complexe analysé ultérieurement. Cette expression formelle permet surtout de montrer que dans la divergence un témoin constate que deux schématisations (S et S*) mises en parallèle (S et S*sont placés l'un sur l'autre) divergent (ce qui est indiqué par *).

269. Les auteurs réservent le concept de contradiction pour des contenus qui s'opposent dans la schématisation d'un même locuteur.

Dans les analyses des situations de malentendu, le *témoin* (T) est le chercheur, les sièges sont les points de vue reconstruits précédemment à l'examen d'une divergence, et c'est le plus souvent la situation qui permet de mettre en parallèle S et S*, que ce soit parce qu'il s'agit de diverses réponses à une même tâche scolaire, ou que le référent est censé être le même en raison des attentes institutionnelles d'appropriation des savoirs enseignés par les élèves.

Examinons à présent plus précisément en quoi peuvent consister ces *divergences*.

La théorie de la communication de Grize (1996) permet de distinguer trois niveaux [270] auxquels l'analyse peut mettre en évidence une divergence :

1. Sur les schématisations prises comme dans leur ensemble : si l'un dit d'une balle "qu'elle tombe vite" et l'autre "qu'elle a de beaux reflets sous la lumière du soleil couchant", la divergence se situe au niveau de l'*éclairage* du référent, voire de la *finalité* (*descriptive* pour le premier, *expressive* pour le second exemple, sans que l'on puisse identifier un élément particulier (ou plusieurs) sur lequel les schématisations comparées divergent.
2. Sur une opération logico-discursive (ou plusieurs) : les schématisations comparées comportent des opérations communes ou semblables, éventuellement des reprises, mais l'analyse permet de montrer que pour (quelques) une(s) de ces opérations, il y a divergence (voir ci-dessous pour la définition). Trois niveaux auxquels ces opérations logico-discursives opèrent peuvent encore être distingués (voir section 3.3.6.3, p. 216).
3. Sur un signe, spécifiquement : à un niveau de détail encore plus fin, l'analyse en termes d'opérations logico-discursive peut se révéler peu descriptive, en particulier lorsque ce sont les rapports de signification (entre signifiant et signifié) ou de dénotation (entre signifiant et objet du signe) qui distingue les schématisations. Lorsqu'un locuteur dit à son auditeur, à l'oral : "ah, je parlais justement de toit...", il est fort probable que l'auditeur reconstruise un rapport de signification différent, que je peux désigner ici en orthographiant le signe du locuteur "toit" par le signifiant /toi/. Dans des cas comme celui-ci, la divergence se décrit plutôt en discutant les relations de *signification*, de *désignation* ou de *dénotation* que par les *opérations logico-discursives*.

Nous sommes désormais en mesure de proposer une définition opérationnelle des *situations de malentendu* :

Il y a *situation de malentendu* lorsque la ou les schématisations des interlocuteurs comporte(nt) des *divergences* au niveau des *finalités*, des *images* des interlocuteurs, des *objets de discours* (définition des classes-objet) ou des *opérations logico-discursives* (1) qui sont importantes et saillantes relativement aux

270. Je serais tenté de nommer ces "niveaux" des "sous-niveaux" ou même des "sous-échelons", car ils spécifient encore ce que j'ai nommé l'*échelon du point de vue singulier* dans la description de la focale de ma perspective (voir figure 3.8, p. 220). Par conséquent, ces sous-échelons peuvent également être utilisés pour spécifier l'échelon du *processus de construction des points de vue*, et fournir des éléments descriptifs pour la discussion de la *coordination entre les points de vue*.

finalités de la ou des schématisations, à la *situation d'interlocution* et à son cadre (p.ex. institutionnel) et contexte ; et (2) qui ne font pas l'objet d'un désaccord explicite et pris en charge par au moins un interlocuteur.

La *situation de malentendu* peut être établie en comparant les contributions de plusieurs interlocuteurs à une schématisation commune – comme dans une conversation orale par exemple, ou en comparant des schématisations construites par un ou plusieurs interlocuteurs à des moments et dans des lieux différents. Le second cas de figure nécessite néanmoins l'analyse d'une *situation d'interlocution* commune, même si elle est définie de manière large, comme l'apprentissage d'une notion ou un sujet de débat politique au sein d'une société donnée.

Deuxième partie

Méthodologie

En fin de compte, nous croyons que l'attitude scientifique, entendue dans un sens très large - un respect pour la clarté et la cohérence logique des théories et pour la confrontation de celles-ci avec les faits - est aussi pertinente en sciences humaines qu'en sciences exactes. Mais il faut être très prudent au sujet des prétentions de scientificité en sciences humaines, et cela vaut également pour les courants aujourd'hui dominants en économie, en sociologique et en psychologie. Tout simplement, les problèmes traités par les sciences humaines sont extrêmement complexes, et les arguments empiriques étayant leurs théories sont souvent assez faibles.

(Sokal & Bricmont, 1997, p. 194)

Chapitre 4

Constitution d'un corpus de traces

Dans ce chapitre, je commence par expliquer la démarche méthodologique utilisée pour constituer un corpus de traces des activités de didactique des sciences des élèves et de l'enseignant. La deuxième section permet de situer la constitution du corpus de traces au sein du projet international de recherche ESCALATE centré sur l'apprentissage des sciences par l'investigation (*inquiry learning*) et par l'argumentation. Cette mise en situation s'explique pour des raisons historiques : la présente recherche a été initiée à l'occasion de ce projet visant à encourager l'apprentissage et l'attractivité des sciences naturelles auprès des nouvelles générations à l'aide de dispositifs d'enseignements innovants.

La troisième section du chapitre décrit le *dispositif d'enseignement mi-fini* élaboré par les chercheurs, comprenant notamment la conception d'un support numérique à l'enseignement (software nommé *Marbles Move*) et de nombreuses tâches de cinématique et mécanique destinées aux élèves de lycée. Cette première étape d'ingénierie didactique comprend l'*analyse préalable* des chercheurs, et en particulier les enjeux pédagogiques et didactiques à l'origine du projet de recherche ESCALATE. Elle présente également la démarche de conception du dispositif d'enseignement mi-fini dans une *analyse a priori* focalisée sur les attentes et objectifs des chercheurs quant au fonctionnement du dispositif d'enseignement. La quatrième section présente les adaptations et compléments aux dispositifs d'enseignement mi-fini et prolonge l'ingénierie didactique dans une seconde étape de conception, focalisée sur les réflexions, objectifs et attentes des enseignants. Cette partie présente également une *analyse préalable* des enjeux de la conception d'un nouveau dispositif, et une *analyse a priori* des objectifs d'apprentissage et des objectifs pédagogiques, mais du point de vue de l'enseignant qui met en œuvre cet enseignement. Son travail de fin d'études lui permet de s'impliquer dans la conception du dispositif d'enseignement, de la modifier et de compléter le dispositif par de nouveaux apports (activité de Travaux Pratiques, questionnaire centré sur les conceptions des élèves en physique, mise en séquence de l'ensemble des activités, etc.).

La cinquième section présente un aperçu de la séquence effectivement mise en œuvre avec les élèves dans la classe étudiée, en revenant sur les attentes à l'égard du fonctionnement du dispositif d'enseignement du point de vue des chercheurs, d'une part, et de l'enseignant, d'autre part, dans une *analyse a posteriori* qui en fournit une forme d'évaluation qualitative. Cette section permet également de fournir les références précises aux activités de la séquence utilisées dans la présentation des résultats. la présentation de la séquence enseignée permet aussi de faire l'inventaire des traces enregistrées : elles sont brièvement présentées dans la sixième et dernière section du chapitre.

Sommaire

4.1 Démarche de recherche . . . 239
4.2 Marcottage à un projet de recherche international . . . 245
4.2.1 Ressources et contraintes issues du projet de recherche . . . 245
4.2.2 ESCALATE : objectifs, démarche et résultats . . . 247
4.2.2.1 Objectifs . . . 247
4.2.2.2 Démarche de recherche et de développement . . . 248
4.2.2.3 Résultats . . . 250
4.3 Ingénierie didactique I : un dispositif d'enseignement mi-fini . . . 253
4.3.1 Analyse préalable des chercheurs . . . 254
4.3.2 Analyse *a priori* du dispositif d'enseignement mi-fini . . . 257
4.3.2.1 Fondements du dispositif et stratégie de mi-finitude . . . 257
4.3.2.2 Le logiciel *Digalo* . . . 260
4.3.2.3 Le choix d'une situation à analyser : le toboggan à billes . . . 261
4.3.2.4 Conception du logiciel Marbles Move et des tâches s'y rapportant . . . 265
4.3.2.5 Essais pilotes du logiciel *Marbles Move*, du dispositif concret et des exercices associés . . . 272
4.3.2.6 Modifications apportées après les essais pilotes : le dispositif d'enseignement mi-fini . . . 280
4.3.2.7 Usages et effets attendus du dispositif d'enseignement mi-fini . . . 283
4.4 Ingénierie didactique II : la séquence d'enseignement planifiée . . . 289
4.4.1 Description du lieu de l'implémentation . . . 289
4.4.1.1 Description du champ socio-culturel : le système d'éducation en Suisse romande . . . 289
4.4.1.2 Description du contexte institutionnel . . . 291
4.4.1.3 Appropriation du dispositif d'enseignement mi-fini par un enseignant . . . 293
4.4.2 Analyse préalable des enseignants . . . 296
4.4.3 Analyse *a priori* de l'enseignant . . . 298
4.5 Ingénierie didactique III : la séquence d'enseignement effective . . . 303
4.5.1 Description de la séquence effective . . . 303
4.5.1.1 Organisation des savoirs à enseigner dans le cours de physique . . . 303
4.5.1.2 Déroulement temporel de la séquence effective . . . 305
4.5.1.3 Mises en scène des leçons de Travaux Pratiques . . . 307
4.5.2 Analyses *a posteriori* . . . 314
4.5.2.1 Reprise effective du dispositif d'enseignement mi-fini . . . 315
4.5.2.2 Retour sur les hypothèses des chercheurs . . . 317

4.5.2.3 Retour sur les hypothèses des enseignants 328
4.6 Inventaires des traces à disposition 337
4.6.1 Transition vers la seconde recherche 337
4.6.2 Repérage en vue des prochaines analyses 337

4.1 Démarche de recherche

L'exigence d'une recherche idiographique (Molenaar & Valsiner, 2005) en milieu naturel, d'une part, et le marcottage à un projet de recherche portant sur d'autres questions, d'autre part, m'ont conduit à une organisation relativement complexe, dont la figure 4.1 ci-dessous représente graphiquement les diverses parties et les liens qu'elles entretiennent entre elles.

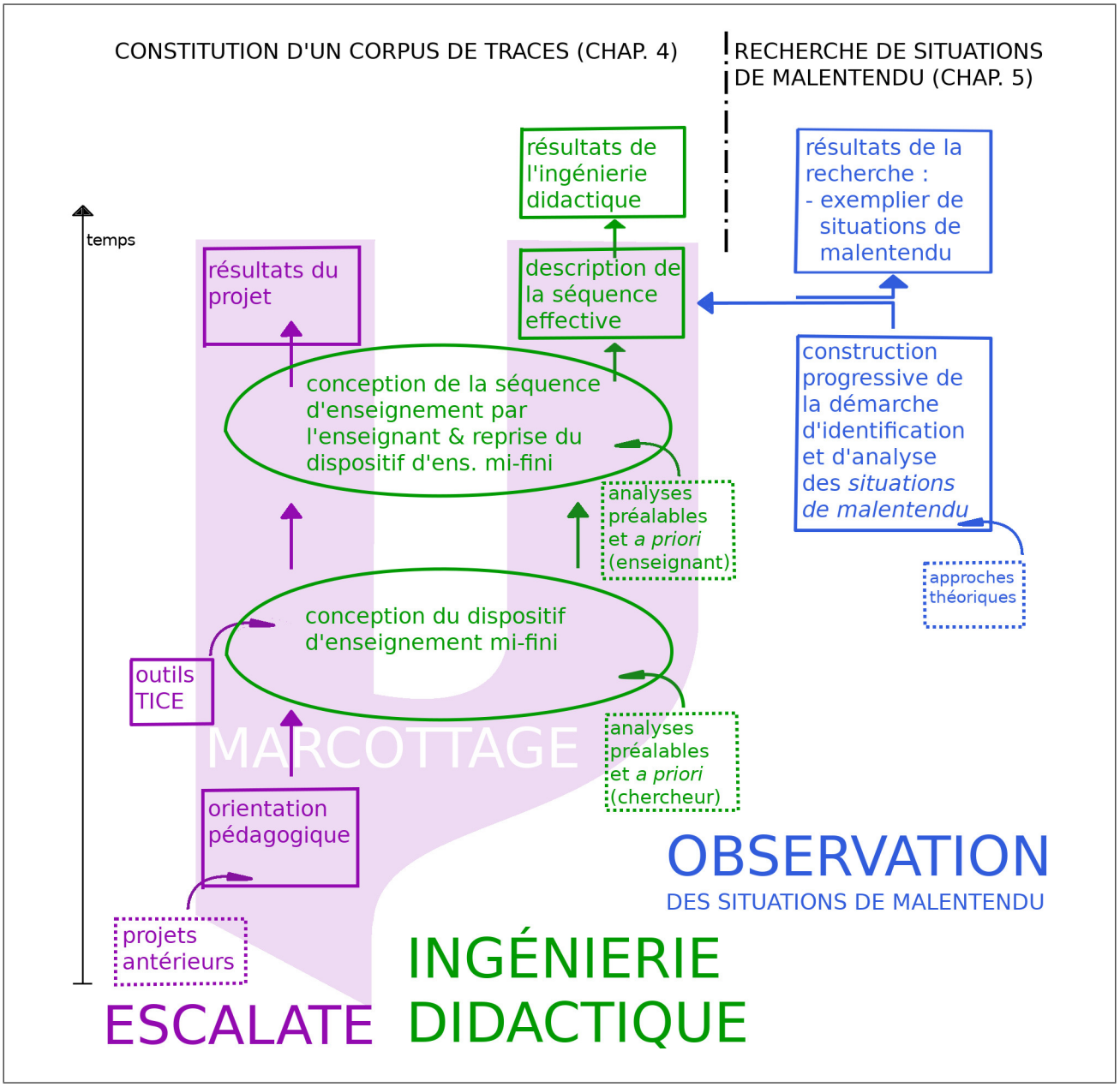


FIGURE 4.1 – Schéma de la démarche empirique.

Le chapitre 4 est explique la démarche de recherche qui a permis la constitution d'un corpus de traces, alors que le chapitre 5 explicite la démarche d'identification et d'analyse des situations de malentendu, construite très progressivement après la constitution du corpus de manière à ce qu'elle permette effectivement de répondre aux questions soulevées et réponde au mieux aux critères de scientificité.

L'objectif principal de la démarche de recherche consiste à constituer un corpus de traces des activités des élèves et de l'enseignant en classe de science, parmi lesquelles des situations de malentendu peuvent éventuellement être observées. La visée descriptive de la recherche m'a conduit à choisir une démarche d'étude de cas, de manière à privilégier un haut niveau de détail dans les résultats plutôt qu'une représentativité ou vision d'ensemble du phénomène. La focalisation de la recherche sur les processus d'apprentissage et de communication requiert des descriptions de situation de malentendu particulièrement détaillées, interprétées en relation avec leur contexte et le moment particulier où elles émergent dans les activités de la classe. Vu le caractère situationnel des malentendus décrits, et l'importance des liens entretenus avec le contexte, le corpus de traces est constitué pour documenter des *pratiques scolaires ordinaires*(voir p.ex. : Leutenegger, 2009), de manière à ce que les enjeux pédagogiques et didactiques discutés à l'occasion des analyses, d'une part, et les descriptions des processus effectuées par les chercheurs, d'autre part, disposent d'une *validité écologique* (Crowley & Schunn, 2001, pp. 115-118).

Ainsi, la démarche de recherche est *clinique* (Leutenegger, 2000, 2009) : la construction des savoirs scientifiques quant aux processus étudiés se fait par l'investigation d'une singularité en lien avec son contexte, et en milieu naturel. Cette démarche clinique était envisagée dans le projet même d'une *pédagogie scientifique* (Morf, Grize, & Pauli, 1969) ou d'une *science didactique* (Grize et al., 1970-1972), comme nous le rappelle Leutenegger, 2009, p. 63 :

> *Pour conclure sur ce point, l'enjeu d'une clinique se trouve sans doute dans le champ de la didactique lui-même. La didactique en tant que science a tout avantage à repousser ses frontières en construisant les méthodes qui lui sont propres, car c'est le projet même de la didactique tel que Morf, Grize ou Pauli, l'ont nourri dès la fin des années 60 et dans les années 70.*

La constitution du corpus de traces pour cette recherche s'inscrit dans l'*étude de la leçon ordinaire* (Leutenegger, 2009), mais elle n'est pas conçue pour en fournir une description d'ensemble : l'objectif consiste uniquement à identifier et décrire des situations de malentendu, dans la mesure où elles émergent à l'analyse. Pour cette raison, je n'aborderai pas les pratiques scolaires étudiées en tant qu'*objets de l'école* (Schubauer-Leoni, 1996, cité par Leutenegger, 2009, p. 88), mais uniquement en tant qu'*objets empiriques* et *objets de recherche*. Selon cette démarche de recherche, les *objets empiriques* contiennent des "faits" et des "événements" (*idem,* p. 90). Au terme "fait" j'ai préféré celui de *traces*, car ce qui *constitue un fait* prête souvent déjà à diverses interprétations. Ces *traces* et ces *événements* sont des "objets empiriques", que Leutenegger définit comme des objets qui "semblent appartenir à la fois à l'institution école et à l'institution recherche"(2009, p. 88). Dans cette recherche, les *traces* sont récoltées comme un matériau tout-venant de manière à maximiser les probabilités d'*événements* considérés dans le contexte et du point de vue du chercheur comme des *incidents critiques* (pour une définition de cette technique, voir p.ex. : FitzGerald et al., 2008 ; Flanagan, 1954 ; Hughes et al., 2007). Au niveau des objets de recherche, Leutenegger (2009) nomme, en référence à Foucault, les observables choisis par le chercheur des "signes pour l'observateur" (*idem,* p. 90) : "Ils sont issus d'une reconstruction de la réalité à partir de "symptômes" qui ne peuvent "se dire"." Du point de vue du chercheur, ces événements peuvent devenir des *objets de*

recherche spécifiques après analyse : des *signes pour l'observateur* que j'appelle *situations de malentendu* et dont j'ai précédemment donné une définition (voir chapitre 3, section 3.4.2).

Leutenegger fait référence à la clinique du domaine médical pour expliciter en quoi consiste cette reconstruction à partir de "symptômes", en prenant l'exemple d'une consultation par un praticien :

> *À partir des signes, le praticien est tenu à une construction, à des inférences, qui ne se réduisent pas à la simple addition des différents signes mais, par regroupement des signes en une configuration signifiante, lui indiquant une probabilité plus ou moins forte que cette configuration de signes renvoie à telle ou telle affection répertoriée.*
>
> *(Leutenegger, 2009, p. 91)*

Dans cette recherche, j'appelle *hypothèse* l'affirmation que je fais quant aux *objets de chercheur* - par exemple "il y a situation de malentendu" - car c'est une reconstruction de la réalité à laquelle peut être associée une probabilité de correspondance avec l'événement étudié, une *vraisemblance*, dont le travail d'analyse permet justement d'estimer la valeur. J'exprime cette valeur par mon degré d'adhésion à telle ou telle hypothèse - par exemple en déclarant que "je suis plutôt en faveur de l'hypothèse d'une situation de malentendu dans ce cas" - pour indiquer la probabilité plus ou moins forte que le "signe pour l'observateur" qu'est *la situation de malentendu* permette effectivement une énonciation du phénomène dont l'ensemble des "symptômes" ne peuvent justement pas "se dire" (*idem,* p. 90). Cette manière d'utiliser le terme *hypothèse* dans une démarche clinique est une simplification du vocabulaire de Foucault présenté par Leutenegger, qui me paraît acceptable au vu de l'usage général du terme en science , et du fait que toute hypothèse est l'occasion, dans les pratiques scientifiques, de jugements par les chercheurs quant à leur vraisemblance. Vu la focalisation de la recherche sur l'articulation de divers points de vue quant au sens des traces analysées, cette acceptation d'*hypothèse* permet de prendre en considération le fait que le chercheur *exerce son point de vue* au cours de l'analyse et de la discussion des situations de malentendu.

La démarche de recherche consiste donc à (1) voir si de telles situations de malentendu émerge lors de l'analyse des traces et événements documentés et, (2) de les décrire le cas échéant, à l'aide de mon *objet de recherche* que constitue justement la définition des situations de malentendu. Autrement dit, il s'agit de (1) faire des objets empiriques des objets de recherche quand et seulement quand c'est pertinent, et (2) fournir une énonciation de l'*objet de recherche* qui permettent de "dire", le mieux possible, l'ensemble de "symptômes" examinés par la recherche.

Cette recherche ne vise donc pas la généralisation ou la représentativité d'un phénomène au sein d'une population : la démarche scientifique utilisée est seulement construite pour assurer la pertinence des descriptions des situations de malentendu en relation avec leur contexte d'émergence, et tout particulièrement la pertinence et la validité écologique des descriptions des *cheminements de pensée* des élèves, selon la "nouvelle orientation" de psychologie microgénétique (Inhelder et al., 1992, p. 22) [271].

271. Voir la citation de la p. 22 à la section 1.2.2, p. 8 et suivantes.

Je reprends ici l'orientation vers une recherche en psychologie portant sur des situations singulières permettant de mettre en évidence des conduites cognitives, sociales et sémiotiques particulières et spécifiques aux tâches et aux contextes étudiés, à une petite nuance près. La focalisation sur l'action des enfants avec du matériel concret des recherches de Inhelder et al. (1992) leur a fait privilégier l'observation de *procédures* mises en œuvre par les enfants, terme utilisé pour faire référence à des "enchaînements finalisés et organisés d'actions" (*idem,* p. 21). Pour cette recherche, j'utiliserai le concept plus général de *processus*, plutôt que de considérer qu'il s'agit de *procédure*, qui permet d'inclure des phénomènes continus se déployant sur une durée plus ou moins longue, qu'ils soient finalisés ou non, et qu'il s'agisse d'actions, d'opérations cognitives ou de communication. Cette nuance provient de l'importance que prend la médiation par le langage et divers registres sémiotiques dans cette recherche : ceci m'oblige à élargir la focale à d'autres *processus* que les *procédures* (sur le plan de l'action concrète), par exemple des *processus* sur le plan logico-discursif.

L'intention d'inclure les processus cognitifs médiatisés par le langage et les processus communicationnels dans la focalisation de la recherche, amène une exigence au niveau de la constitution du corpus de traces. Dans les pratiques ordinaires d'une classe de physique, la communication très spécialisée repose largement sur des implicites, et risque de ne laisser aux chercheurs que trop peu de traces discursives pour leur permettre de proposer une interprétation et des analyses suffisamment étayées. Pour pallier à ce risque, j'ai participé à la construction d'un dispositif d'enseignement centré sur l'argumentation des élèves et faisant largement usage d'une organisation du travail des élèves en groupe de pairs, favorisant ainsi les échanges oraux et écrits de manière à augmenter la production de traces discursives de la part des élèves et de l'enseignant au fil de leurs activités.

Pour permettre l'observation d'une classe de physique dans son fonctionnement ordinaire, la conception et la mise en œuvre des activités de didactique des sciences étudiées ont été réalisées *en collaboration avec les enseignants en charge de la classe* (pour une définition générale de cette démarche collaborative, voir Cobb, 1999). Plus précisément, la démarche de recherche collaborative s'est organisée autour de la transmission aux enseignants d'un dispositif d'enseignement sous une forme inachevée, un *dispositif d'enseignement mi-fini*, qui laisse l'enseignant libre de puiser les éléments qui l'intéresse, de les modifier et de les combiner à ses propres idées ou habitudes de travail. Cette démarche de recherche collaborative explique la double *ingénierie didactique* (Artigue, 1988) présentée dans ce chapitre 4 : à l'ingénierie didactique du chercheur d'un *dispositif d'enseignement mi-fini* (décrite à la section 4.3) s'ajoute celle de l'enseignant (décrite à la section 4.4), de telle sorte que la séquence d'enseignement effectivement mise en œuvre avec les élèves (décrite à la section 4.5) combinent des objectifs d'origines diverses, et peut être mise en relation avec deux analyses *a priori* distinctes : celle du chercheur, et celle de l'enseignant. Il s'agit donc d'étudier une *classe ordinaire*, ou autrement dit de *décrire des conditions de fonctionnement des systèmes en "milieu naturel"* (Leutenegger, 2009, p. 5), indépendamment du travail d'ingénierie didactique fait en amont et qui a surtout permis de maximiser la productions de traces discursives par les élèves.

Le corpus de traces contient des enregistrements audio, vidéo et les reproductions électroniques des écrits des élèves et de l'enseignant produits durant la séquence effective. Il sera utilisé pour la description

des situations de malentendu. La constitution de ce corpus de traces s'est centrée sur l'enregistrement des discussions entre pairs, car elles constituent un lieu privilégié de l'observation de la construction de sens par les élèves. Les interactions entre pairs fournissent non seulement des traces utiles à l'étude des différences dans la construction de sens entre les représentations des élèves et celles de l'enseignant (Carugati, 1999), elles peuvent aussi constituer le lieu même de l'élaboration du sens que les élèves donnent aux activités qui leur sont proposées et aux savoirs enseignés, à l'articulation entre pensée quotidienne et pensée scientifique, et entre la pensée collective institutionnalisée par l'école et la pensée individuelle des élèves en apprentissage :

> *When evidence is offered that peer culture is of crucial importance for the construction of shared meaning of school demands and for learning in everyday life, we are at the core of the (possibly conflictual) dialogue between scientific and everyday knowledge. It is plausible to work out the general hypothesis that peer culture of classrooms is the everyday laboratory within which specific interpretations of science selected by teachers and taught as school subjets, are interpreted and given sense by pupils through a common work.*
>
> *(Carugati, 1999, p. 230)*

Considérer l'interaction sociale comme un lieu où les élèvent construisent le sens qu'ils donnent aux activités et aux savoirs ne signifie par pour autant que tous les participants de ces interactions partagent une même construction de sens au même moment ; décrire les variations de ces processus de construction de sens dans des situations singulières constitue justement un défi important de la recherche dans ce domaine :

> *Thus a future challenge is to study the mutual relationship between the collective and individual notions and to examine the situated dynamics of learning together ; how the knowledge construction is mutually enhanced by both individual minds and collaborative efforts (cf. Barab et al., 2001). Pedagogically, it is important to see that even though different groups work at the same tasks, the groups' and individuals' activity and meaning negotiations may differ extensively.*
>
> *(Arvaja, Saloovaara, Häkkinen, & Järvelä, 2007, p. 458)*

Cette recherche vise à contribuer à relever ce défi, en se centrant sur des événements issus du corpus de traces et identifiés par le chercheur comme des *incidents critiques* en regard du contexte, et que j'analyse ensuite avec l'hypothèse qu'ils correspondent à des situations de malentendu. Les fondements théoriques et la méthode d'analyse permettant de produire les résultats sont présentés au chapitre suivant (chapitre 5).

4.2 Marcottage à un projet de recherche international

4.2.1 Ressources et contraintes issues du projet de recherche

Notre recherche a pris racine dans le projet de recherche Enhancing Science Appeal in Learning through Argumentative inTEraction (2006-2007) [272], ci-après ESCALATE. La métaphore botanique du *marcottage* (voir figure 4.2) exprime l'ancrage dans un projet de recherche qui a donné naissance à une nouvelle recherche qui se nourrit du projet ESCALATE et le prolonge par une nouvelle question de recherche et des investigations supplémentaires. Ces investigations font néanmoins usage du travail de recherche conduit à l'occasion du projet, la constitution du corpus de traces ayant eu lieu lors de la réalisation du projet ESCALATE. Cette relation de *marcottage* entre le projet ESCALATE et la recherche présentée ici justifie une brève introduction aux objectifs et enjeux du projet ESCALATE.

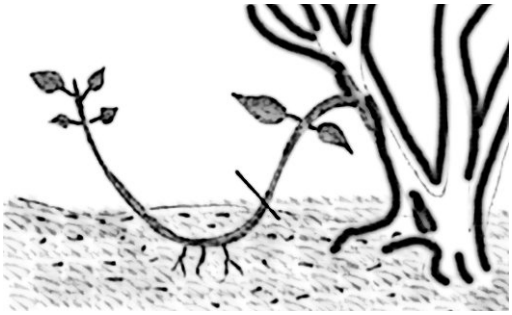


FIGURE 4.2 – Schéma de marcottage en botanique.

Ce marcottage de la recherche au projet ESCALATE est l'occasion à la fois d'opportunités et des contraintes. Du côté des opportunités, les éléments suivants peuvent être cités :

— la recherche bénéficie, grâce au projet ESCALATE, de l'observation d'une séquence d'enseignement innovante, qui correspond à bien des égards à l'état-de-l'art des activités de didactique des sciences au moment de la constitution du corpus de trace (en particulier l'orientation sur l'*inquiry learning* et l'argumentation), notamment du fait qu'elle procède d'un projet de recherche visant justement la création de nouvelles formes d'enseignement inspirées par les recherches récentes en sciences de l'éducation et en didactique des sciences ;

— la séquence d'enseignement bénéficie d'outils numériques spécifiquement conçus dans ce but par les partenaires privés du projet ESCALATE, et du projet précédent DUNES ;

272. Projet $n^{\circ}020790$ du plan d'action *Science et Société* (SAS) du $6^{ème}$ *Programme-cadre de recherche et développement de l'Union Européenne*, financé par la Commission Européenne, et regroupant les institutions et partenaires suivants : School of Education (project coordination), Hebrew University of Jerusalem, Israël (Prof. Baruch Schwartz) ; Institut de psychologie, Université de Neuchâtel, Suisse (Prof. Anne-Nelly Perret-Clermont) ; The Institute of Education, The University of London, Royaume-Uni (Prof. Shirley Simon) ; Educational Technology Lab, University of Athens, Grèce (Prof. Chronis Kynigos) ; Talent Information Systems SA, Athènes, Grèce ; Laboratoire Cognition, Communication & Development (Octogone-ECCD), Université de Toulouse II - Le Mirail, France (Dr. Valérie Tartas).

— la recherche dans son ensemble a profité du travail d'équipe, s'inspirant des résultats de nombreux travaux de recherche partagés pour l'occasion et bénéficiant des échanges entre chercheurs, enseignants et informaticiens à l'échelle internationale.

Du côté des contraintes, le marcottage au projet ESCALATE peut être invoqué pour expliquer certains choix :

— le choix d'une démarche de recherche collaborative à l'aide d'un dispositif d'enseignement mi-fini résulte d'une prise de position au sein du projet ;

— la constitution d'un corpus de traces sur un temps relativement court s'explique par le calendrier du projet ;

— si la séquence d'enseignement effective documentée par le corpus de traces constitue bien une pratique des enseignants en charge de la classe permettant l'observation d'une *classe ordinaire*, la conception de cette séquence n'est pas, en tant que telle, tout à fait *ordinaire* puisqu'elle a fait l'objet du développement par l'équipe ESCALATE sous la forme d'un *dispositif d'enseignement mi-fini*[273] ;

— si le *dispositif d'enseignement mi-fini*, et tout particulièrement le logiciel *Marbles Move* élaboré et testé dans la recherche ESCALATE, se sont révélés satisfaisants du point de vue de l'enseignant, ils ont également suscité de nombreuses questions qui n'ont pu être traitées ni dans le cadre du projet de recherche ESCALATE, ni dans cette recherche sur les situations de malentendu, pour le premier par manque de temps, et pour la seconde recherche parce que la question s'est orientée sur un autre chose.

Ainsi, la recherche sur les situations de malentendu consiste en l'étude d'un cas d'enseignement dans sa complexité, lui-même issu de la recherche ESCALATE, afin d'y relever des processus tels qu'ils se déroulent dans un milieu naturel. Je défends l'idée que le milieu demeure naturel, quand bien même un travail d'ingénierie est réalisé collaborativement par l'enseignant et les chercheurs d'ESCALATE, du moment que le dernier mot dans les décisions de conception de la séquence et le pilotage de la séquence sont laissés à l'enseignant en charge de la classe. L'observation d'une telle classe ordinaire inclut évidemment la pratique de l'enseignant dans l'objet de le recherche, et ne peut être considérée comme une simple application "neutre" d'un dispositif d'enseignement : de nombreux détails importants relèvent de gestes, discours, manières de procéder issues des pratiques antérieures et des habitudes de l'établissement scolaire et du milieu socio-culturel dans lequel la classe déploie ses activités. Le "milieu naturel" ne peut donc se réduire au dispositif construit dans et pour ESCALATE, ni même à la séquence co-construite et planifiée par l'enseignant participant à la recherche, puisque de nombreux aspects de la pratique effective d'enseignement

273. Et, en raison des contingences de la collaboration établie avec les enseignants expliquées plus loin, la séquence fait également l'objet d'une ingénierie didactique et d'une recherche par l'enseignant participant à la recherche, qui en fait son *mémoire professionnel* (travail de fin de formation initiale à l'enseignement).

observée dans cette classe relève de traditions locales[274] propres à la culture et au moment historique, à l'établissement scolaire, voire aux Travaux Pratiques de physique.

4.2.2 ESCALATE : objectifs, démarche et résultats

4.2.2.1 Objectifs

Le but du projet de recherche ESCALATE (2006-2007) consiste à développer des propositions pédagogiques, fondées sur les résultats et outils numériques de précédents projet (DUNES IST-2001-34153, LeGa project GSRT-03-26). Ces propositions pédagogiques prennent appui sur une littérature émergente, au moment de la requête, orientée à la fois vers le raisonnement et la communication argumentée dans l'apprentissage des sciences (voir p.ex. : Driver et al., 1996, 2000 ; D. Kuhn, 1991 ; D. Kuhn, Amsel, & O'Loughlin, 1988 ; Osborne, Erduran, & Simon, 2004a ; Osborne et al., 2001 ; Schwarz et al., 2003), et sur l'apprentissage par expérimentation (*inquiry learning*) (voir p.ex. : Connelly, Finegold, Clipsham, & Wahlstrom, 1977 ; Schauble et al., 1995 ; White & Frederiksen, 1998).

Les objectifs du projet ESCALATE[275] consistent, plus spécifiquement, à :

— implémenter dans des contextes authentiques d'apprentissage une approche pédagogique des sciences basée sur l'argumentation et l'expérimentation, ses méthodes et ses outils ;

— implémenter parallèlement des essais et études pilotes en France, en Grèce, en Israël, au Royaume-Uni et en Suisse ;

— réunir un nombre suffisant d'enseignants pour maintenir les pratiques au-delà de la durée du projet ;

— fournir la description des essais réalisés et des recommandations pour de futures initiatives semblables ;

— disséminer les résultats de la recherche, notamment par le projet Kaleidoscope NoE (IST-FP6-507838).

Aux principaux objectifs du projet décrits ci-dessus, s'ajoutent les objectifs secondaires et moyens suivants :

1. Concevoir des activités d'apprentissage centrée sur l'argumentation.
2. Former des enseignants des sciences à la conception, animation et évaluation d'activités en classe basées sur l'expérimentation et l'argumentation.
3. Utiliser des outils numériques en médiation à des discussions entre élèves, qui permettent un étayage par l'enseignant.

274. Fournir une description de ces traditions nécessiterait un travail ethnographique qui va au-delà de mes compétences. J'ai néanmoins constitué, à l'occasion de la recherche, la description sommaire d'une séquence antérieure à celle qui constitue le corpus de trace et conduite par le même enseignant et selon les habitudes du lieu, transmises notamment par l'accompagnement du formateur en établissement. Cette description est disponible à l'annexe D, section D.2, p. 949.
275. Extrait traduit de l'anglais par l'auteur, et tiré de la requête du projet, p .4.

4. Disséminer largement les activités développées.

4.2.2.2 Démarche de recherche et de développement

La démarche de recherche élaborée pour ESCALATE comprend des éléments de *recherche & développement*, comme la conception de propositions pédagogiques (nommés *cases* dans le projet) et celle d'outils numériques, notamment des micromondes (*microworlds*) (Kynigos, 2007 ; Papert, Vassallo-Villaneau, & Perriault, 1981). La proposition pédagogiques et les outils numériques impliqués dans la recherche sur les situations de malentendu sont présentés ci-dessous, dans la section 4.3.

Le déroulement du projet peut être résumé de la manière suivante :

Début 2006 présentation par le partenaire technique des possibilités de programmation de *microworlds*, et constitution d'un cadre de référence pour l'élaboration des *cases* ;

Printemps 2006 élaboration des *cases* par les équipes en collaboration avec des enseignants au niveau local, et en interaction au niveau international avec le partenaire technique pour l'élaboration d'outils numériques spécialement conçus pour les *cases* ;

Été 2006 essais pilotes et présentation des *cases* construits dans les diverses équipes, reprises de certains *cases* pour des implémentations multiples ;

Automne 2006 implémentation des *cases* par les équipes nationales en collaboration avec les enseignants ou autres partenaires (p.ex. un musée à Toulouse).

Hiver 2007 mise à disposition en ligne des *cases* et bilans des implémentations sur divers sites (observations, entretiens) en vue de la rédaction du rapport de recherche ;

Printemps 2007 rédaction du rapport final.

Été 2007 publication des résultats, notamment au congrès EARLI et sur le site internet http ://escalate.org.il et ensuite par le projet Kaleidoscope.

Cette démarche de recherche & développement est conçue comme un moyen visant la transformation des pratiques à travers l'implémentation de communautés d'enseignants dans les cinq pays des partenaires de la recherche ; elle n'a pas pour but, dans ce projet, la publication de ces propositions pédagogiques ou des outils numériques, par exemple sous la forme de manuels d'enseignement.

Au vu des objectifs du projet, la collaboration avec les enseignants et la constitution de communautés locales ont été privilégiées lors de l'élaboration des propositions pédagogiques. La mise en œuvre de l'implémentation citée dans le projet s'est opérationnalisée en référence au modèle d'introduction de pratiques innovantes de l'*Active learning* (Ivic, Pesikan, & Antic, 2002). Ce modèle de référence a permis d'enrichir la notion de *case*, reprise du projet DUNES, en ajoutant à l'idée générale d'études de cas centrée sur la conception et la mise en œuvre de propositions pédagogiques des principes pour cette conception :

1. *Le* case *contient des objectifs pédagogiques spécifiques quant à la matière enseignée.*
2. *Le* case *spécifie les ressources d'enseignement de la matière enseignée.*
3. *Le* case *présente les caractéristiques des divers groupes d'élèves ou étudiants impliqués : leur motivation à apprendre, leurs compétences, leurs connaissances préalables, leurs expériences de vie en relation avec les ressources étudiées, leurs connaissances d'autres sujets d'enseignement et les éventuels obstacles avec des tâches particulières.*
4. *Le* case *décrit les conditions dans lesquelles s'inscrivent les processus d'apprentissage : contexte scolaire d'une classe, d'un laboratoire ou hors de l'école.*
5. *Le* case *énonce les idées de l'équipe enseignante quant à leur enseignement et ses hypothèses quant à l'apprentissage d'une matière spécifique dans les conditions imaginées et planifiées, selon (Ivic et al., 2002, p. 94).*

(traduit de Schwarz, 2008, p. 16)

Ces éléments correspondent aux attentes des analyses préalables et *a priori* de la démarche francophone d'ingénierie didactique (Artigue, 1988). C'est la raison pour laquelle, par simplicité, je les présenterai selon ce modèle dans les sections suivantes, de manière à présenter l'ensemble du processus de conception de la séquence étudiée dans la recherche sur les situations de malentendu en faisant usage du même modèle méthodologique.

La démarche de recherche se double d'une intention praxéologique, qui consiste à faire des enseignants participant au projet plus que de simples utilisateurs. La désignation de *end users* utilisée dans DUNES et héritée du domaine de la programmation informatique est abandonnée au profit d'un autre concept, celui des propositions pédagogiques et outils numériques *half-baked* (Kynigos, 2007) : les enseignants sont dès lors considérés comme les co-constructeurs des Cases, et ils sont associés à la recherche en tant que tels. Cette démarche de recherche collaborative a fait l'objet d'une présentation et traduction en français ultérieure au projet (Kohler, Chabloz, & Perret-Clermont, 2015).

La recheche ESCALATE a notamment mis en place des ateliers de formation et des ressources en lignes dans le but de donner aux enseignants participant le rôle central qui lui avait été reconnu dans DUNES pour la réussite d'une pédagogique basée sur l'argumentation :

> *We therefore highlighted the central role of the teacher, who becomes an inventor and designer of the case rather than a "simple" lecturer or a demonstrator. In order to achieve this goal of shifting teachers' tasks from preparing lessons and lectures to making real inventions in science teaching activities, we developed and implemented a sound teacher's training program and workshops to allow a large number of teachers to share our ideas and expertise and to put them in practice in their own schools.*
>
> *(Schwarz, 2008, p. 19)*

Ce rôle central accordé à l'enseignant va de pair avec la mise en place d'une formation des enseignants, même si celle-ci est restée limitée en raison de la brièveté du projet ESCALATE. La formation des

enseignants est l'occasion pour les chercheurs de présenter les approches pédagogiques valorisées dans la littérature de recherche, mais surtout d'inviter les enseignants à participer à la conception des propositions pédagogiques, à établir des collaborations entre eux et à s'informer mutuellement de ce qu'ils font déjà dans leurs classes. Dans certains pays - au Royaume-Uni et en Israël - l'approche choisie pour la constitution d'une communauté d'enseignants a pris la forme d'une formation continue libre ou obligatoire, alors que dans les autres pays - France, Grèce et Suisse - c'est par le biais de la formation initiale et des relations interpersonnelles entre les chercheurs et les enseignants que les collaborations se sont établies.

4.2.2.3 Résultats

Le projet ESCALATE a été présenté à de nombreuses occasions dans les cinq pays participant, aux autorités du système éducatifs, aux enseignants, enseignants en formation et étudiants. La démarche d'implémentation a suscité l'intérêt dans les lieux choisis.

Au fil du projet, certaines idées sont apparues centrales (Schwarz, 2008, p. 346) lors de la construction des propositions pédagogiques centrées sur l'argumentation et l'expérimentation :

1. La connaissance scientifique se construit chez les personnes qui interagissent avec d'autres.
2. Cette construction est motivée par un besoin (du milieu didactique).
3. Pour être acceptable, ces constructions doivent se faire selon des méthodes scientifiques.
4. Ces constructions prennent du sens pour les participants si elles s'effectuent dans des activités scientifiques.

Les observations et analyses se sont centrées autant sur les processus de construction des propositions, d'appropriation par les enseignants ou autres partenaires du terrain, que sur le fonctionnement de ces propositions et outils numériques en référence à la vision d'un enseignement des sciences basé sur l'expérimentation et l'argumentation. Diverses méthodes ont été utilisées pour évaluer les implémentations dans les différents pays (Schwarz, 2008, p. 347) :

— observation participante de l'engagement des élèves dans les activités et dans la collaboration avec leurs pairs, et de leur satisfaction ;

— analyse des productions, en particulier des explications et arguments fournis par les élèves à l'oral ou à l'écrit ;

— performance à des post-test sur la matière enseignée ;

— cohérence des réponses des élèves aux questions posées ;

— entretien par *focus group* ;

— analyse des usages et des productions des outils numériques.

L'observation des propositions pédagogiques construites au cours du projet et l'évaluation du processus d'implémentation ont été analysés en termes de *leçons apprises* (*lessons learned*) au cours de la recherche, et de *bonnes pratiques* (*good practice*). Dans cet optique, les résultats décrivent les expériences d'implémentation et offrent des recommandations pour guider des initiatives semblables. Le rapport de recherche (Schwarz, 2008) comprend une partie spécifiquement dédiée à décrire l'expérience acquise dans et par la mise en place de communauté d'enseignants utilisant des ressources d'enseignement construites dans ESCALATE. Ainsi, les résultats présentent un "aperçu intégrateur de l'implémentation sur les différents sites" (*idem,* p. 349), produisant des résultats tant au niveau de l'adéquation pédagogique des propositions et outils relativement au contexte, que sur le processus même d'implémentation de nouvelles pratiques pédagogiques à partir d'un projet de recherche.

Les résultats montrent que :

1. Les outils numériques de médiation des discussions argumentées aident à fournir des traces des activités des élèves et rendent plus praticables les évaluations et analyses de l'argumentation des élèves.

2. Dans certains pays où l'argumentation fait partie du curriculum, les enseignants ont pu reconnaître et évaluer la structure des arguments des élèves.

3. Les objectifs du projet sur la conception de propositions pédagogiques dans une collaboration entre chercheur, concepteur informatique et enseignant ont partiellement réussi : le *case* concerné par cette recherche (voir section 4.3) fait partie des 3 *cases* du projet où ces objectifs ont été au moins partiellement atteints.

4. Le rôle des enseignants dans la mise en oeuvre des propositions pédagogiques est particulièrement complexe, à l'interface entre le soutien à des activités procédurales pour l'expérimentation, à la modération de discussions qui sont des activités conceptuelles (argumentation), et à la gestion des usages d'outils numériques où ces deux niveaux se mêlent avec des enjeux liés à l'usage collaboratif et à l'appropriation des outils numériques.

5. Enfin, les résultats quant aux processus d'implémentation montrent que ceux-ci dépendent largement de la spécificité de chaque contexte institutionnel où les pratiques ont été introduites, et que parmi tous les facteurs impliqués dans le succès de ces pratiques, l'intérêt des enseignants pour les propositions pédagogiques est particulièrement important. Les adaptations des propositions par les enseignants les plus impliqués dans le projet, bien loin de constituer des détournements des objectifs d'ESCALATE, se sont révélées des enrichissements de valeur au projet dans son ensemble.

Ainsi, ESCALATE avait pour premier objectif de développer des scénarios didactiques permettant d'implémenter une approche de l'apprentissage des sciences basée sur l'argumentation et l'expérimentation, et de constituer un ensemble de nouvelles pratiques (approche par l'argumentation et l'expérimentation, utilisation des logiciels, engagement actif dans l'ingénierie didactique) au sein de communautés d'enseignants des sciences capables de maintenir dans la durée les activités développées par la recherche.

L'objectif consistant à faire en sorte que les communautés d'enseignants continuent à utiliser les *cases* développés en collaboration avec les chercheurs au-delà de la recherche ESCALATE s'est révélé trop ambitieux pour un projet de cette envergure, et cela indépendamment du succès locaux des activités pédagogiques. Par ailleurs, la littérature (voir p.ex. : Couture, 2005 ; Garduño, 1998) documentent les difficultés liées à l'implémenter de nouvelles pratiques pédagogiques. L'idée d'un partage en ligne de ressources pédagogiques à l'échelle internationale visant à favoriser la constitution de communautés d'enseignants actives et engagées dans ces nouvelles pratiques, de manière à ce qu'elles restent actives au-delà de la durée du projet et essaiment dans les divers pays, a néanmoins pris la forme d'un site internet (http ://escalate.org.il) disponible pendant une dizaine d'années après la fin du projet.

4.3 Ingénierie didactique I : un dispositif d'enseignement mi-fini

La séquence d'enseignement constitutive du corpus de traces de la recherche sur les situations de malentendu s'est inspirée de l'un des *cases* du projet ESCALATE mis en œuvre en Suisse : *Marbles Move*. Ce *case* fait l'objet d'une description, de la conception à l'implémentation, dans un chapitre du rapport de recherche ESCALATE (Perret-Clermont, Muller Mirza, Perret, Kohler, & Tateo, 2008). L'extrait du rapport relatif au *case Marbles Move* est reproduit en annexe (Annexe D, p. 948). Le *case* du projet ESCALATE a été intégré à la recherche sur les situations de malentendu dans une démarche d'*ingénierie didactique* (Artigue, 1988) d'un *dispositif d'enseignement mi-fini* (Kohler et al., 2015), dispositif ensuite proposé aux enseignants qui l'ont adapté à leurs objectifs.

Cette démarche d'ingénierie didactique d'un dispositif d'enseignement mi-fini nécessite une conception en deux temps, dédoublant les analyses préalables et *a priori* traditionnelles à l'*ingénierie didactique* :

1. Cette section est dédiée à la conception du *dispositif d'enseignement mi-fini* par le chercheur, en collaboration avec l'équipe du projet ESCALATE.

2. La prochaine section est dédiée au deuxième temps de la conception, à savoir la conception par l'enseignant de la séquence planifiée, en collaboration avec le chercheur et ses collègues enseignants de physique.

La présentation de la conception selon la méthodologie de l'*ingénierie didactique* permet de fournir les réflexions à l'origine de la conception du dispositif d'enseignement et les hypothèses quant à son fonctionnement. Les outils numériques jouent un rôle important dans la conception et l'orientation pédagogique de la séquence d'enseignement, et l'un d'entre eux - le logiciel *Marbles Move* - a été conçu par le chercheur en collaboration avec les informaticiens partenaires du projet ESCALATE. Cette conception d'un outil numérique fait donc partie intégrante de l'ingénierie didactique et est également présentée ci-dessous.

Par contre, les *tâches prescrites* et les *tâches effectives* (Leutenegger, 2009, p. 81) déléguées aux élèves au fil de la séquence ne seront pas discutées en détail, en raison du grand nombre de tâches concernées. Comme elles nécessitent un plus haut niveau de détail que la présentation générale de la séquence, j'ai choisi de ne discuter ces tâches que lorsque c'est nécessaire, et de le faire à l'occasion des présentations des situations de malentendu, au chapitre 6.

Dans cette section 4.3, je présente la conception du dispositif d'enseignement mi-fini par les chercheurs. Si je suis l'auteur du *case Marbles Move* et du dispositif d'enseignement transmis aux enseignants, j'utilise néanmoins "chercheurs" au pluriel du fait que cette conception s'est largement inspirée des réflexions et échanges de l'équipe active dans le projet ESCALATE, et de la littérature de didactique des sciences réunie pour le projet. En ce sens, les analyses préalables et *a priori* explicitées ci-dessous bénéficient des savoirs et de l'expérience collective de l'équipe du projet, et y font référence lorsque la littérature est disponible.

4.3.1 Analyse préalable des chercheurs

L'analyse préalable est ancrée dans les réflexions à l'origine du projet ESCALATE, qui prend elle-même sa source dans les projets précédents de l'équipe. Ces réflexions et recherches précédents, trop complexes pour être synthétisées ici, aboutissent dans le projet ESCALATE au choix de deux principaux ingrédients à la conception de nouvelles propositions pédagogiques : l'*inquiry learning* et l'*argumentation*.

L'*inquiry learning* est un mouvement américain émergent au moment des grandes réformes de l'enseignement des sciences dans les années 1970-80, à la suite de la victoire russe à la compétition vers la conquête de l'espace par Spoutnik (pour une discussion plus détaillée, voir Minstrell & Zee, 2005). L'initiative *La main à la pâte* de (Charpak, 1996, 1998) a beaucoup contribué à une version française du mouvement, et s'oriente vers une reconstruction des concepts et démarches scientifiques par l'observation outillée, notamment avec l'usage d'un cahier d'expériences. Prenant appui sur les observations de Piaget et son équipe, ce mouvement vise à rétablir le lien entre les conduites d'exploration et de découverte spontanées de l'enfant et l'apprentissage scolaire en institution, en renforçant les liens entre science et vie quotidienne, dans l'objectif d'une éducation intégrant l'enfant - son intérêt spontané à la découverte - le chercheur - sa méthodologie et ses outils - et le citoyen que préparent les institutions scolaires (pour une synthèse et un bilan de *La main à la pâte*, voir Charpak, Léna, & Quéré, 2005).

Si le mouvement de rénovation de l'enseignement des sciences a enregistré un grand succès en termes d'implémentation, il soulève néanmoins une question fondamentale sur le plan pédagogique à laquelle il ne répond pas :

> *Comment peut-on à la fois prendre appui sur l'expérience quotidienne des élèves et conduire un enseignement des sciences qui permette aux élèves de s'approprier les concepts scientifiques ? L'analyse du mouvement nord-américain de rénovation de l'enseignement des sciences nous confirme qu'il y a là un problème clef mais elle ne nous fournit pas la solution de ce problème.*
>
> *(Da Silva, 2004, p. 15)*

L'orientation d'ESCALATE sur l'argumentation dans la construction des connaissances en sciences peut être considérée comme la tentative de fournir une réponse, au moins partielle, à ce problème touchant plus spécifiquement aux *processus* d'apprentissage. L'idée principale des réflexions pédagogiques prolongeant l'*inquiry learning* consiste à reconnaître en l'argumentation une activité constitutive de la science (Latour & Woolgar, 1979), et à faire l'hypothèse que son utilisation dans l'enseignement permettrait aux élèves de mieux comprendre l'activité scientifique et la nature des connaissances produites par la science (Driver et al., 1996).

L'approche choisie dans ESCALATE se base également sur une autre tradition de recherche, post-piagétienne, qui a montré que l'interaction sociale, et plus particulièrement lorsqu'elle est argumentée, permettait à certains élèves de dépasser leurs conceptions antérieures (Buchs & Butera, 2004 ; Doise et al., 1975 ; Perret-Clermont, 1979, 2004 ; Perret-Clermont & Nicolet, 1988 ; Perret-Clermont & Schubauer-

Leoni, 1981). Dans ce sens, l'utilisation de l'argumentation en sciences se présente comme une solution possible au problème des conceptions des élèves préalables à l'enseignement formel (Driver et al., 1985 ; Giordan et al., 1994). Ces conceptions se sont montrées particulièrement robustes, notamment en physique, malgré les efforts d'enseignement. Les activités de discussion et d'argumentation en sciences sont présentées dans la littérature comme une piste pour, d'une part, faire émerger ces conceptions et, d'autre part, contribuer à permettre leur révision (Howe et al., 1992). L'argumentation peut amener les apprenants dans des conflits socio-cognitifs qui peuvent se révéler efficaces (Schwarz, Neuman, & Biezuner, 2000), à certaines conditions, pour un apprentissage en profondeur où les apprenants transforment leurs conceptions initiales [276], en particulier lorsque l'activité met à la fois les élèves en collaboration et leur fournit des moyens d'expérimentation (inquiry learning). Néanmoins, il est important d'ajouter que la possibilité de susciter des conflits socio-cognitifs à travers une activité d'argumentation n'est qu'un élément parmi d'autres d'une approche qui vise à fournir aux élèves un environnement dans son ensemble plus favorable à un apprentissage des sciences (Driver et al., 2000 ; Erduran & Jiménez-Aleixandre, 2008 ; McAlister, 2001 ; Muller Mirza & Perret-Clermont, 2009). Quoiqu'il en soit, la collaboration est considérée comme jouant un rôle important dans le développement cognitif (Rogoff, 1998). La citation suivante de la requête d'ESCALATE illustre cette intention de conception d'environnement intégrant de nombreux éléments pertinents issus de la littérature :

> *In spite of what we described above, it is clear to us that argumentation and cognitive conflicts are generally not sufficient to improve science learning. We would maintain that a well-designed learning environment is also necessary. Such learning environment must first support a preparatory stage that engages teachers in a process of "discovery teaching", where they fashion their conceptions and perceptions of students' needs and understanding.*
>
> Source : Requête du projet ESCALATE

Concrètement, la conception de dispositif d'apprentissage (*learning environment*) par les diverses équipes de chercheurs, associés à des enseignants, s'articule autour des points suivants, définis comme le cadre commun pour ESCALATE :

— le choix d'une tâche pertinente pour l'enseignement des sciences ;

— l'élaboration d'un logiciel *microworld* ou modélisation en trois dimensions ;

— la planification pédagogique des activités et de l'usage de Digalo et des *microworld* qui offre les meilleurs conditions pour stimuler des activités d'expérimentation et d'argumentation dans lesquelles les apprenants s'engagent.

L'introduction d'outils numériques à disposition des élèves dans l'approche pédagogique d'ESCALATE a pour objectif d'offrir un espace pour l'expérimentation et pour la collaboration, mais aussi de représenter visuellement les points de vue et le déroulement d'un échange argumenté entre élèves, afin qu'ils puissent

276. Par exemple, (Howe et al., 1995, p. 483) affirme que "Previous research has shown that peer collaboration can facilitate conceptual change in physics, as long as learners approach the exercices with differing conceptions about the issue at stake".

en prendre conscience, s'y référer dans une discussion ultérieure, voire que l'enseignant puisse en faire usage pour un commentaire ou une évaluation. Les outils numériques soutenir le processus d'expérimentation des élèves, en leur offrant une visualisation utile à l'identification de variables, à la résolution de problèmes, à la planification d'expérimentation voire à diverses représentations des mesures effectuées. Cela peut offrir un soutien à des processus comme l'utilisation d'une argumentation basée sur des résultats expérimentaux, ou l'élaboration et l'évaluation d'hypothèses.

Enfin, le projet ESCALATE répond à un appel européen pour la recherche dans le domaine de l'apprentissage des sciences qui réagit à un problème d'attractivité des filières d'études et des professions scientifiques, inquiétant les milieux politiques et économiques. La notion d'attractivité regroupe plusieurs problèmes, par exemple la réputation de difficulté des études en sciences de la nature, l'inégalité homme-femme, ou encore les représentations de la science au sein de la société. Néanmoins, quelles que soient les raisons du manque d'attractivité des filières de sciences de la nature et de technologie, le problème est le même au niveau de la relève sur le marché du travail : celui-ci se montre de plus en plus exigeant et demandeur de formation scientifique ou technologique.

En Suisse, le problème existe aussi : voici quelques chiffres fournissant un indicateur de la pertinence du problème pour la Suisse au moment où le projet de recherche ESCALATE débute, en 2006 :

> *Le nombre d'étudiants dans les sciences humaines et sociales a augmenté de 45% depuis 1995/96. Viennent ensuite les sciences exactes et naturelles et le droit avec chacune une augmentation de 23%, les sciences économiques (+18%) et les sciences techniques (+10%). En revanche, le nombre d'étudiants en médecine et pharmacie est resté stable (+2%).*
>
> *(Oeuvray, Dubach, & Cappelli, 2006, p. 16)*

Ces chiffres sont à mettre en rapport avec l'augmentation moyenne du nombre d'étudiants entre les années 1995/96 et 2005/06, qui est de 27% tous domaines confondus. La situation de *statu quo* du nombre absolu d'étudiants en médecine est liés à une politique de *numerus clausus* et n'est pas l'indicateur d'une perte d'attractivité. Les chiffres n'indiquent pas de diminution du nombre d'étudiantes en sciences exactes, ni même de diminution de la proportion d'étudiants dans ce domaine, même si la progression y est plus faible que dans d'autres filières d'études. Par contre, les sciences techniques attirent proportionnellement moins d'étudiants que la moyenne (+10% contre +27%). La demande de la société envers les formations scientifiques et techniques est néanmoins aussi croissante en Suisse, et le problème de l'attractivité se pose au moins en termes de rapport entre la demande et les choix de formation des jeunes.

Par ailleurs, un certain malaise existe depuis longtemps face à la réputée difficulté des sciences dites "dures" à l'école, avec son lot de représentations sociales, notamment en défaveur des filles. L'extrait suivant du rapport 2007 sur l'éducation de l'Office Fédéral des Statistiques met en évidence l'intérêt politique pour cette question au moment du projet, et la place de la Suisse en comparaison internationale :

> *Les économies nationales misent beaucoup sur les formations tertiaires en mathématiques, science et technologie pour améliorer leur compétitivité. Ces formations conditionnent en effet le bon fonctionnement de la recherche et de l'innovation. C'est pourquoi l'Union européenne entend accroître d'au moins 15% d'ici à 2010 le nombre de diplômés de ces domaines, tout en réduisant les disparités entre les sexes (Conseil de l'Union européenne, 2003). La Suisse poursuit des objectifs similaires, aussi bien pour ce qui est de l'augmentation du nombre de diplômes que de la réduction du déséquilibre entre les sexes (Conseil fédéral, 2007).*
>
> *En 2004, près d'un cinquième des diplômes délivrés au degré tertiaire (formation professionnelle supérieure et hautes écoles) en Suisse l'ont été dans les domaines des mathématiques, de la science et de la technologie. En comparaison internationale, notre pays se classe juste sous la moyenne des pays considérés. La France arrive en tête, avec un taux de 29%.*
>
> *(Ryser & von Erlach, 2007, p. 62)*

Si la proportion des femmes en formation post-obligatoire en Suisse a considérablement augmenté de 2000 à 2010 (O.F.S., 2013), des différences importantes [277] demeurent dans les filières des sciences exactes et de la technologie. Par ailleurs, malgré l'augmentation du nombre de diplômes délivrés par les Hautes Écoles suisses, l'importante immigration hautement qualifiée dont bénéficie la Suisse indique qu'il s'agit d'un enjeu de société toujours actuel. Un rapport publié peu de temps avant le début du projet de recherche (Coradi, Denzler, Grossenbacher, & Vanhooydonck, 2003) souligne la pertinence d'une perspective genre dans le problème de motivation aux filières d'études en mathématiques, sciences techniques et sciences physiques en Suisse. Je serai attentif à cette dimension lors de la conception d'une proposition pédagogique et lors des analyses des situations de malentendu, car elle présente un potentiel certain, sinon le meilleur, pour une revalorisation des ces filières d'études en Suisse.

4.3.2 Analyse *a priori* du dispositif d'enseignement mi-fini

4.3.2.1 Fondements du dispositif et stratégie de mi-finitude

Le choix et la construction des tâches du dispositif d'enseignement mi-fini ont été effectués à partir d'un ouvrage visant à offrir une synthèse des résultats de recherche en didactique de la physique à l'intention des formateurs d'enseignants (Tiberghien et al., 1997), particulièrement utile pour la conception de pratiques innovantes. Après avoir parcouru une vaste littérature internationale [278] quant aux processus d'apprentissage permettant aux élèves de construire des concepts scientifiques, j'ai choisi les hypothèses de la même auteure (Tiberghien, 2007) pour fonder la conception didactique, brièvement résumées par les extraits ci-dessous :

> *On the other hand our hypothesis may contradict the idea that learners acquire new concepts at once. We do not completely exclude this possibility but we consider it very rare.*

277. Le rapport cité montre les résultats d'une enquête sur les étudiants et examens finaux des hautes écoles effectuée par le *Système d'information universitaire suisse* (SIUS) et l'*office fédéral de la statistique* (OFS), sur la base de données extraites le 30 avril 2013, où par exemple 6715 hommes contre 1736 femmes sont en études en sciences exactes en 2012, et 716 hommes contre 426 femmes en technologie pour la même année.

278. Pour la liste des références examinées, voir les chapitres 1 à 3.

> *The cognitive cost can be very different from one element to another, depending particulary on the set of elements in which it will be inserted.*
>
> *These hypotheses lead us to consider that taught knowledge favours knowledge acquisition if it involves repetition or re-use of new elements of knowledge.*
>
> *(Tiberghien, 2007, p. 4)*

L'auteure distingue divers types de facettes de connaissances que les élèves acquièrent indépendamment les unes des autres, très progressivement, et qui peuvent former, une fois réunie, ce que la littérature désigne habituellement par *l'apprentissage conceptuel*. Or, toujours selon l'auteure, avant d'acquérir cette vision d'ensemble de l'experte, les élèves sont sujets à des biais de raisonnement, par exemple celui qui consiste à utiliser des causalités simples (pour plus de détail à ce sujet, voir Tiberghien, 2004). Un ouvrage collectif (Tiberghien, 2002) reprend cette psychologie de l'apprentissage des sciences dans une perspective développementale, montrant le caractère très progressif des acquisitions au fil des années, et proposant des éclairages sur les processus importants.

Dans les extraits cités ci-dessus, Tiberghien suggère que c'est les usages répétés de ces facettes de connaissances, en les mettant en relation les unes avec les autres, qui permettent à l'élève d'acquérir des connaissances. Ailleurs, Tiberghien soutien l'idée que les liens entre les concepts doivent être encouragés par le dispositif didactique :

> *Nous proposons ici deux aspects essentiels de la conceptualisation : - le changement de niveau entre la question qui porte sur des événements et la réponse qui met en jeu des grandeurs (température, chaleur). Il y a décalage par rapport à la perception et au raisonnement causal simple. – la combinaison de deux notions (. . .)*
>
> *(Tiberghien, 1989a, p. 238)*

C'est pourquoi j'ai choisi de concevoir une activité incrémentale, où les questions s'accumulent au fil de la séquence sur une situation à analyser qui demeure identique, favorisant ainsi le lien entre ces facettes de connaissances chez les élèves. Le rapport ainsi pensé entre une situation à analyser et les concepts de physique s'inspire des travaux montrant l'importance du processus de modélisation (Brna et al., 2002 ; Vince & Tiberghien, 2000). L'approche théorique de (Tiberghien, 1994) montre le rapport de détail entre les spécificités du contenu d'une tâche transmise aux élèves et la possibilité qu'ils ont d'en dégager les invariants lors de leur apprentissage. La construction de ces invariants permet justement aux élèves l'identification et la différenciation des variables (voir la discussion des travaux piagétiens ci-dessus) indispensable au processus de modélisation essentiel à la physique. Plusieurs hypothèses sous-tendent cette approche :

— les physiciens opèrent à une forte sélection lorsqu'ils interprètent le monde à l'aide des concepts de leur discipline ;

— l'apprenant se construit un modèle lorsqu'il interprète une situation matérielle, qui dépend de son point de vue ;

— l'apprenant est cohérent dans ses propos, mais de son point de vue : ceci inclut non seulement d'éventuelles références à la physique, mais aussi à d'autres éléments du contexte social, culturel et historique.

Ce processus d'identification et de séparation des variables selon les phénomènes étudiés est très éloigné d'une approche quotidienne du monde matériel. D'où l'idée, dans cette séquence pédagogique, de partir d'une analyse holistique et incrémentale d'un phénomène choisi, permettant aux apprenants de partiellement reconstituer la démarche de modélisation à travers ces différentes étapes (sélection de variables, définition et affinement des concepts, succession de perspectives différentes sur le même phénomène, hypothèse et confrontation à l'observation, explication des "anomalies" par rapport à la théorie construite, etc.).

Dans le dispositif d'enseignement mi-fini, j'ai donc choisi de constituer un milieu didactique à partir d'une situation concrète à interpréter - ce que est parfois nommé *physique qualitative* - avant de demander aux élèves de résoudre des problèmes arithmétiques et vectoriels, suivant en cela le conseil de Driver et al. (1985) :

> *When the precise mathematical formulations of mechanics are the sole focus of teaching, rote-learning of formulae often replaces understanding of concepts. One obvious strategy to prevent this is to teach physics without numbers, at least in the early parts of a sequence of teaching. (...) Qualitative problems similarly focus on concepts and the relationships between concepts.*
>
> *(Driver et al., 1985, pp. 101-102)*

Partant de la situation complexe du toboggan à billes permet peut-être d'éviter le raisonnement à une seule variable des exercices scolaires classique, où l'attention des élèves est d'emblée focalisée sur les savoirs enseignés spécifiquement choisis pour la tâche. En cohérence avec cette approche d'une situation complexe, j'ai inclus le frottement dans la conception du logiciel Marbles Move en m'inspirant de la proposition de Viennot (1989c) d'élargir la physique enseignée au-delà du consensus de simplification à quelques variables (ce qu'elle appelle la *réduction fonctionnelle*) et de complexité formelle (au niveau de la résolution mathématique). Dès lors, j'espère amener les élèves à des raisonnements transversaux aux divers concepts de la physique et échappant au cloisonnement des "matières scolaires". En effet, (Viennot, 1989c, p. 88) déplore que "ces non-dépendances à une seule variable exprimée ne font que renforcer l'illusion qu'on peut raisonner économiquement, et la tendance générale au raisonnement à une seule variable" et que "la participation des enseignants à ce type de raisonnement (...) apparaît aussi bien de manière active, dans le discours écrit ou oral des enseignants, que de manière passive dans leur seuil de tolérance, très bas, devant des énoncés à structure linéaire causale inappropriée". Nous retrouvons ici le problème du raisonnement causal simple qui intéressait Piaget et son équipe.

Le choix de construire un dispositif d'enseignement permettant d'aborder de nombreux concepts à travers une seule situation à analyser permet d'économiser le temps d'adaptation et réduire les difficultés que les élèves rencontrent à l'analyse qualitative d'une situation (White, 1993, met en évidence ces difficultés).

Au vu de l'analyse préalable présentée ci-dessus, la conception du dispositif d'enseignement mi-fini s'est centrée sur la construction du logiciel *Marbles Move*, qui présente l'avantage de réunir les autres objectifs opérationnels (choix d'une tâche pertinente, planification des usages des outils numériques) dans un objet facilement transmissible aux enseignants, et permettant de communiquer les enjeux théoriques du dispositif d'enseignement mi-fini en les incarnant dans un artefact plutôt que par un discours académique. Ainsi, le dispositif d'enseignement mi-fini consiste en deux éléments :

— le logiciel *Digalo*, développé dans le projet DUNES pour permettre des conversations argumentées à distance et synchrones, qui est immédiatement fonctionnel ;

— le logiciel *Marbles Move*, construit pour l'occasion, et une série de tâches spécifiquement conçues pour l'usage du logiciel, qui vise à soutenir la modélisation *par les élèves* de la même situation par une succession incrémentale d'analyses spécifiques en cinématique et mécanique, de manière à mettre en relation les concepts de vitesse, accélération, force, gravitation et inertie.

La stratégie de mi-finitude de ce dispositif d'enseignement consiste à transmettre aux enseignants ces deux éléments en leur demandant de les intégrer dans une séquence, en les laissant délibérément libres et sans orientation précise quant aux nombreux autres choix à effectuer dans la planification de cette séquence. Ces deux éléments sont présentés ci-dessous avec le raisonnement effectué lors de la conception, alors que les choix de l'enseignant permettant la construction de la séquence planifiée sont présentés à la section suivante.

4.3.2.2 Le logiciel *Digalo*

Digalo est un logiciel produisant un *graphe d'argumentation*, connu anciennement sous le nom de "bullogramme" (Astolfi et al., 1984, p. 123) pour présenter de nombreux avantages. La recherche de Lund et al. (2007) montre également que les graphes d'argumentation peuvent être intégrés à un milieu didactique avec succès, moyennant des instructions adéquates aux élèves. L'intérêt spécifique de *Digalo* pour enseigner l'argumentation ou pour soutenir la production des élèves et ses divers usages dans des milieux didactiques différents ont déjà fait l'objet de plusieurs publications (Muller Mirza & Perret-Clermont, 2008 ; Muller Mirza, Tartas, Perret-Clermont, & De Pietro, 2007 ; van Diggelen, Overdijk, & Andriessen, 2004).

Digalo est un logiciel *Java* et dispose d'une version serveur et d'un client. Il permet une conversation médiatisé par ordinateur en connexion synchrone ou asynchrone, où les participants doivent choisir le statut (question, argument, opposition, etc.) de leurs contributions écrites et peuvent les relier aux autres contributions déjà présentes. Au fil du développement du graphe, les participants peuvent réorganiser ces liens et positionner spatialement l'ensemble de la discussion. *Digalo* permet également un paramétrage avant l'utilisation d'un graphe, en configurant les statuts des contributions (noms, formes, couleurs, etc.) et en ajoutant des couches permettant plusieurs graphes dans la même session. Les fonctionnalités du logiciel permettent également à l'enseignant de jouer le rôle de modérateur, notamment en limitant l'accès des élèves à l'écriture ou à des couches spécifiques, et en supprimant ou modifiant des contributions.

Enfin, Digalo a été conçu dans l'intérêt des chercheurs de disposer de traces écrites et séquentielles des conversations argumentées entre élèves. Le logiciel permet non seulement l'enregistrement du graphe d'argumentation et la lecture des contributions des élèves, celles-ci se faisant par écrit, mais dispose également d'une fonction replay qui permet de revoir dans l'interface graphique du logiciel la construction progressive du graphe.

Dans le dispositif d'enseignement mi-fini, Digalo est simplement proposé comme un outil numérique à disposition, sans obligation d'usage ni proposition pédagogique.

4.3.2.3 Le choix d'une situation à analyser : le toboggan à billes

Pour construire le logiciel *Marbles Move* à partir des propositions du partenaire technique d'ESCALATE, j'ai commencé par choisir une situation à analyser qui se prêtait à l'approche incrémentale (cf. ci-dessus) dans le domaine de la cinématique et de la mécanique.

La situation retenue reprend un dispositif expérimental piagétien [279] composé d'une piste incurvée aux deux extrémités sur laquelle une bille va d'abord descendre d'un côté, puis remonter de l'autre, pour redescendre en sens contraire, etc. Piaget fait référence à ce dispositif expérimental dans sa synthèse sur la "constitution des forces" (Piaget & Garcia, 1971, p. 55) en citant la recherche (R 43). Pourtant, les questions posées aux enfants lors de la recherche permettent plutôt d'étudier l'*énergie potentielle*, car elles interpellent les enfants sur le lien qu'ils font - ou ne font pas - entre la hauteur à laquelle une bille est lâchée sur la piste et la hauteur qu'elle atteint de l'autre côté, en fin de course, c'est-à-dire juste avant de repartir dans l'autre sens. En fait, cette situation est justement intéressante parce qu'elle permet d'aborder de nombreux concepts de cinématique et de mécanique. Inhelder et Piaget (1955) ont utilisé un dispositif semblable pour étudier la manière dont les enfants parviennent ou non à considérer des variables indépendamment les unes des autres : le dispositif comprend un seul pan incliné, que quitte pour une brève trajectoire horizontale avant de faire un saut en bas de la table. Les enfants peuvent réfléchir à la chute de la bille et à la longueur du saut à partir de diverses variables (la hauteur sur le pan incliné où la bille est lâchée, la masse de la bille, la taille de la bille, etc.).

Piaget et ses collaborateurs ont également utilisés des tâches semblables avec des billes en mouvement, dans le cadre de recherches sur la transmission du mouvement et sur la causalité. Les billes ont également été utilisées à l'horizontale, dans les recherches de Inhelder et Piaget (1955) sur la "conservation du mouvement" (*idem,* p. 110), abordée en physique notamment par le concept de *quantité de mouvement*. Dans cette recherche, une boule est projetée sur un plan horizontal par un ressort. Le *principe de l'inertie* de Newton affirme qu'elle conserverait un *mouvement rectiligne uniforme* indéfiniment, si aucun obstacle ne venait justement la ralentir ou dévier sa course. Or, dans les faits il est impossible d'observer un mouvement infini - puisque cela suppose que l'observateur a une infinité de temps à disposition pour son observation - et extrêmement difficile d'observer un *mouvement rectiligne uniforme*, c'est-à-dire ni accéléré

279. En fait, cette tâche remonte au moins à Galilée, qui l'utilisa pour décomposer le mouvement dans une expérience de pensée célèbre.

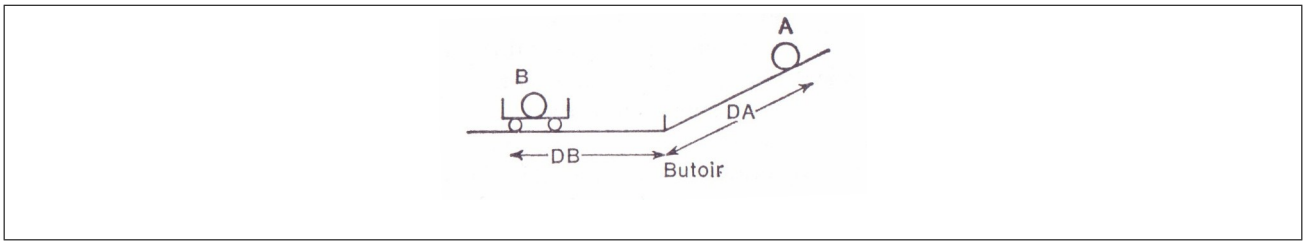


FIGURE 4.3 – Schéma du dispositif expérimental (Piaget, 1972a, p. 21).

ni décéléré, puisqu'il faut pour cela créer un environnement sous vide. L'expérience de Inhelder et Piaget (1955) consiste à demander aux enfants de faire des prévisions et des essais avec des billes de diverses tailles et poids. Les explications des plus jeunes sont souvent contre-factuelles, énonçant par exemple que les petites billes vont plus loin parce qu'elles sont plus faciles à lancer, et que les grosses iront plus loin parce qu'elles sont plus fortes. À un deuxième stade de réponses, les enfants procèdent à des corrections après avoir fait l'expérience, et commencent à inverser le problème, s'intéressant aux causes du ralentissement. Une réponse typique de cette étape consiste à dire "elle est trop lourde pour aller plus loin". Au troisième stade identifié par les chercheurs, les enfants procèdent à un renversement explicite du problème en cours d'expérience : ils recherchent les causes qui entravent le mouvement en prenant appui sur l'idée que si rien n'agit, le mouvement se conserve. Ce raisonnement est cohérent avec le principe d'inertie de Newton, et est considéré dans la théorie piagétienne comme une des *conservations* acquises au fil du développement de l'enfant : la conservation du mouvement.

Piaget et de ses collaborateurs reprennent également cette tâche dans des travaux sur la transmission du mouvement (Piaget, 1972a), qui permettent de discuter du rapport entre le développement de la causalité notionnelle chez l'enfant, et la perception de la causalité. Piaget discute en détail des expériences de Michotte (1954), et reprend en partie ses situations expérimentales pour proposer une autre interprétation quant à l'origine de la notion de causalité dans la connaissance humaine (Bunge, Halbwachs, Kuhn, Piaget, & Rosenfeld, 1971) : plutôt que d'y voir une catégorie de pensée innée, dans la ligne de Kant, les expériences de Piaget le conduisent à défendre la position de Hume, pour qui la causalité prend son origine dans une inférence lors de l'observation d'événement subséquents, à cette nuance près que pour Piaget ce n'est pas une observation passive, visuelle, mais la proprioception complexe du lien entre l'action effectuée par l'enfant lui-même et ses effets qui lui permet cette construction d'une notion de causalité. Cette interprétation théorique permet notamment une explication des erreurs fréquentes de jugement constatées par Michotte (1954) où les participants à ses recherches infèrent des causalités là où il n'y en a pas. Elle permet aussi de montrer les limites de la notion de causalité (voir à ce sujet ma modeste contribution à ce vieux débat Kohler, 2014a), pourtant encore considérée aujourd'hui par nombre de philosophes ou chercheurs en sciences humaines comme le *summum* du savoir scientifique.

Dans cet ouvrage (Piaget, 1972a), le dispositif expérimental est représenté (voir figure 4.3 pour une reproduction) :

Dans les tâches impliquant des billes qui s'entrechoquent comme ci-dessus, la cause déterminant la transmission du mouvement met en jeu une *force* de poussée, et la *force* de réaction (ou résistance) du

corps immobile, dont la conceptualisation apparaît beaucoup plus tardivement chez les enfants. Piaget (1972a) met en évidence, avec cette tâche, que le schème explicatif où le poids de B s'ajoute à celui de A pour en favoriser l'action est primitif par rapport aux autres (p. 24), et il distingue trois types de *raisonnements par compensation* où les élèves annule un effet par un autre, sans considérer aucunement une estimation des grandeurs en jeu. Dans ces raisonnements, la *masse* de la bille fonctionne tantôt comme poussée, tantôt comme résistance. Cette difficulté était présente dans la mécanique de Galilée autour des notions d'*impeto* (*impulsion*) et de *momento* (équivalent chez Galilée de l'inertie d'aujourd'hui, c'est-à-dire de la force motrice et de la résistance d'une masse, l'étymologie se retrouve justement dans le terme anglais pour *quantité de mouvement* - the *momentum* - qu'il convient de distinguer de l'*inertie*), et ce n'est pas un des moindres mérites de Newton que d'être parvenu à offrir un concept permettant de rendre compte à la fois de la *masse* comme poussée et comme résistance, grâce à la nouvelle formulation des lois du mouvement qu'il propose, et au concept d'*inertie*.

Une expérience réalisée par A. Szeminska et al. (Piaget, 1974a) sur la transmission du mouvement à travers des objets immobiles utilise également un dispositif semblable :

> *Vous mettez un ensemble de billes qui sont rangées sur un plan et une bille qui va descendre et va heurter la première bille de cette rangée. On demande alors à l'enfant ce qui va se passer. Les petits prévoient naturellement que toutes vont partir. Mais quand l'enfant fait l'expérience lui-même, il découvre que seule la dernière part. On lui demande pourquoi seule la dernière bille a-t-elle bougé ? Nous avons alors plusieurs stades de réponses : les plus jeunes s'imaginent que la bille qui est descendue est allé toucher directement la dernière en passant derrière l'ensemble des autres. Cette hypothèse un peu imaginative se rencontre chez les enfants de 4 à 5 ans.*
>
> *A un deuxième stade, l'enfant se représente la transmission comme étant une suite de mouvements conçus comme des déplacements, des translations molaires, c'est-à-dire intéressant l'ensemble de la bille et non pas seulement des secousses ou vibrations. L'enfant prétend que la bille qui descend est venue taper la première, la première a bougé et a tapé la deuxième qui a tapé la troisième etc. jusqu'à la dernière qui est partie. Si les autres ne sont pas parties c'est que la suivante retenait toujours la précédente sauf en ce qui concerne la dernière. La transmission ici commence à être comprise, mais elle est comprise comme une série de transmissions immédiates, c'est-à-dire comme une boule qui heurte l'autre boule comme s'il n'y en avait que deux, mais qui se répète N fois s'il y a N boules : chacune bouge et va taper la suivante.*
>
> *Il y a ensuite un troisième stade qui débute vers 7-8 ans ; c'est là que nous pouvons commencer à parler de réelle transmission médiate. L'enfant nous dit : celle qui descend a tapé la première et lui a donné de l'élan. Puis cet élan est transmis à la suivante et ainsi de suite. L'enfant précise en outre que l'élan "traverse" les boules, c'est-à-dire que par le mouvement de l'une qui va taper la suivante il y a un élan qui passe à travers toutes et qui finit par chasser la dernière. Nous avons donc là un début de transmission médiate : il y a quelque chose qui passe à travers, mais si l'enfant atteint cette transmission médiate, il n'accepte pas encore l'immobilité des médiateurs, il pense encore qu'il y a une légère translation molaire et si on lui fait vérifier les choses il maintient son idée. Voici par exemple un contrôle consistant à lui faire tenir solidement un verre sur un tapis de mousse artificielle.*
>
> *On demande à l'enfant de presser bien fort sur le verre, on met une bille à gauche tandis que sur la droite une bille vient taper le verre. La bille de gauche part. L'enfant peut bien constater*

que le verre est immobile puisqu'il le serre fort lui-même contre le tapis. Mais l'enfant nous dit en général : "ça a bougé un petit peu, j'ai senti que ça a bougé".

(Piaget, 1974a, pp. 12-13)

J'ai trouvé les explications des enfants particulièrement intéressantes[280] sur ce dispositif, ce qui m'a décidé à le reprendre : il fait d'ailleurs écho au *pendule de Newton* (voir figure 4.4), qui aurait été construit justement pour mettre en évidence la conservation de la *quantité de mouvement* et de l'*énergie cinétique*, mais plutôt par les prédécesseurs de Newton.



FIGURE 4.4 – Pendule de Newton.

Toujours dans les investigations liées à la notion de *causalité*, une autre recherche (R 41) (Piaget & Garcia, 1971, p. 54) utilise le pendule de Newton, afin d'étudier comment les concepts de *vitesse* et de *force* se différencient progressivement chez les enfants, à partir d'une notion indifférenciée qu'il nomme *action*, comprenant la masse, le temps et la distance sans établir de rapports précis entre ces grandeurs. Piaget explicite les étapes successives permettant d'arriver à la deuxième loi de Newton $F = m \cdot a$. Selon Piaget, cette première notion indifférenciée *action* se construit par analogie à partir de sa propre action sur le monde matériel, ce qui étaye son interprétation d'une origine de la notion de causalité dans la connaissance du sujet des effets de ses propres actions. Ces travaux montrent que le concept de physique d'une *force* qui *accélère* une *masse* est associée, dans un premier temps, à des confusions sur le rôle du *poids* et de la *masse*. Lorsque l'*accélération constante* de la bille qui dévale la pente est constatée, un premier pas est fait dans la direction du rapport $F = m \cdot a$. *Poids* et *vitesse* sont alors considérés comme des "forces", mais sans une signification précise comme nous la trouvons chez Newton, où le concept de *poids* vaut précisément la *force de gravitation* exercée sur la *masse* par la Terre. C'est une différenciation encore plus précise qui permet à l'enfant de faire la synthèse entre les composants additifs de la *masse* et les opérations ordinales constitutive de la *vitesse*, toujours selon la théorie piagétienne. Je reviendrai sur ces résultats qui ont joué un rôle très important dans la présente recherche, à deux niveaux au moins :

1. Ces analyses m'ont fait prendre conscience de la nécessité de distinguer les mots utilisés par les enfants ou élèves et le sens qu'ils prennent de leur point de vue : une recherche s'intéressant aux

280. Je ne savais pas encore combien les commentaires des enfants à cette tâche retranscrits par l'équipe piagétienne sont pertinents. Alors que l'on y verrait volontiers des "conceptions" erronées, notamment du fait de l'usage du terme élan, ce sont d'excellentes descriptions de ce qui se passe sur le plan physique, comme me l'a fait remarquer B. Chabloz : "le verre a vibré ! en effet qu'est-ce qui pousserait la bille sortante, sinon l'onde de choc ? On a évidemment besoin d'invoquer les forces "créant" les solides (les billes) et l'absence de force de liaison entre elles si on veut comprendre pourquoi toutes les billes ne partent pas ensemble à vitesse plus faible que celle de la bille incidente, comme elles le feraient si elles étaient collées l'une à l'autre."

processus cognitifs ne peut se permettre de confondre les deux. Dans les travaux de Piaget et de son équipe, les chercheurs ont fait preuve d'une grande précaution à cet égard, même s'ils ne disposaient pas d'une démarche d'analyse explicite des discours des enfants interrogés.

2. La théorie piagétienne expliquant la construction des concepts comme une différenciation progressive, quelque soit l'apprenant - c'est-à-dire pour le sujet épistémique -, s'est révélée non seulement corroborée par ma recherche portant sur des situations singulières - des sujets psychologiques - mais elle a aussi fourni la clef de l'interprétation de plusieurs situations de malentendu, qui se jouent justement sur le niveau de différenciation des interactants, au niveau cognitif autant que discursif.

Ces expériences de Piaget ont inspiré la conception du logiciel *Marbles Move* autour d'une tâche qui intègre plusieurs des variantes citées ci-dessus, et à laquelle je ferai désormais référence sous le nom de *toboggan à billes*, par commodité. L'objectif de cette tâche sur laquelle convergent plusieurs analyses à l'aide de concepts différents consiste à ce qu'elle fonctionne comme une *problématisation* (voir p.ex. : Orange, 2005a, 2005b) pour les élèves, sans devoir exiger d'eux-même un tel investissement réflexif d'emblée. En effet, pour que les apprenants s'engagent dans une activité d'apprentissage en général, et c'est d'autant plus nécessaire pour qu'ils argumentent, ils doivent d'abord *se poser le problème*, comme le soulignait déjà Aebli en 1951 :

> *Deux principes didactiques en ressortent clairement : Toute connaissance, toute opération acquise à l'école doit répondre à un besoin, à un problème né dans un contexte vital. Lorsque la nouvelle idée ou conduite est formée, elle doit être mise à l'épreuve dans la réalité, soit par application, soit par contrôle expérimental.*
>
> *(Aebli, 1951, p. 27)*

L'aspect intriguant du phénomène choisi pour la tâche du *toboggan à billes* a été pensé pour jouer ce rôle, hypothèse que j'ai mise à l'épreuve lors d'une première observation avec les essais pilotes du logiciel *Marbles Move*.

4.3.2.4 Conception du logiciel Marbles Move et des tâches s'y rapportant

La recherche ESCALATE a permis aux chercheurs de construire des logiciels faits sur mesure pour les propositions pédagogiques développées dans le projet, à partir de logiciels *half-baked*, c'est-à-dire de logiciels mi-finis permettant de programmer plus rapidement les logiciels éducatifs spécifiques demandés par les chercheurs : *MachineLab* pour des logiciels nécessitant la 3D et *E-Slate* pour des logiciels en langage *logo*. Cette solution technique, nécessaire pour pouvoir produire un grand nombre de logiciels spécifiques dans les délais impartis par la recherche et en collaboration avec les chercheurs, a inspiré la démarche de recherche collaborative par *dispositif d'enseignement mi-fini* (Kohler et al., 2015).

Le logiciel *Marbles Move* a été construit avec *E-Slate* comme un *microworld* (micromonde), notion qui remonte aux travaux de Papert et ses collègues avec le langage *logo* (Papert, Watt, diSessa, & Weir, 1979),

travaux eux-mêmes issus des ouvertures vers la cybernétique de la théorie constructiviste et interactionniste de Piaget. L'idée était alors de fournir aux apprenants des environnements "intelligents" construits par les moyens de l'informatique, alors en plein essor, leur permettant non seulement d'expérimenter les boucles rétro-actives (*feed-back*) initiées par le logiciel, comme dans les tutoriels désormais connus de tous, mais aussi de participer activement à la programmation de l'outil numérique lui-même, par des boucles rétro-actives initiées par les apprenants par lesquelles ils modifient eux-mêmes leur environnement d'apprentissage et ses règles de fonctionnement pour les adapter à leurs objectifs.

Voici un aperçu de l'esprit dans lequel de tels outils ont été inventés à l'époque :

> *Piaget a souligné comment les enfants acquièrent d'eux-mêmes les notions mathématiques de base, en commençant par élaborer leurs propres mathématiques bien différentes de celles des adultes (celles du stade préconservationniste en sont un exemple). De même apprennent-ils à parler en acquérant d'abord leur propre dialecte (en "parlant bébé"). Aussi, quand nous envisageons nos micromondes de physique comme des incubateurs d'idées productrices, nous efforçons-nous de nous inspirer de ce modèle efficace entre tous. Nous mettons l'élève en mesure d'apprendre la physique "officielle" en lui laissant toute liberté d'en inventer d'autres, de son propre cru, et qui seront opérationnelles dans les mondes imaginaires correspondants.*
>
> *(...) nos apprentis physiciens peuvent à présent mettre les choses en mouvement, et donner naissance à des graphismes dont la forme et les dimensions évoluent sans cesse à leur guise. Ils disposent d'un pouvoir accru, et ressentent l'impression de "posséder" la dynamique... ils peuvent faire de l'animation sur ordinateur – ce qui leur confère une nouvelle attitude, plus personnelle, vis-à-vis de ce que leur présentent les écrans de télévision et les jeux électroniques. Les effets visuels de mouvement qu'ils remarquent dans une émission télévisée, dans un dessin animé ou sur l'écran d'un jeu vidéo les amènent dès lors à se demander comment ils pourraient s'en inspirer dans leurs propres réalisations. C'est là un type de questions fort différent de celui auquel doivent répondre d'ordinaire les élèves dans les "laboratoires de sciences" traditionnels. Dans la traditionnelle pédagogie de laboratoire, la tâche proposée aux enfants est de démontrer une vérité donnée. Dans le meilleur des cas, les enfants apprennent que "c'est ainsi que fonctionne le monde". Dans le micromonde des Tortues dynamiques, ils accèdent à une tout autre forme de compréhension – ils pressent le pourquoi des choses. En expérimentant toutes sortes de lois du mouvement, ils en viennent à découvrir que les lois newtoniennes sont finalement la plus économique et la plus élégante façon dont les objets puissent se mouvoir.*
>
> *(Papert et al., 1981, p. 159 & 162)*

Kynigos (2007) donne une présentation plus complète des *micromondes*, notamment de leur origine, des objectifs dans lesquels ils sont utilisés dans l'enseignement des sciences et de leurs apports et désavantages pour l'apprentissage [281].

281. Je tiens à souligner la grande actualité de ces anciens travaux, au moins sur le plan pédagogique. En effet, si les outils numériques eux-mêmes se sont depuis largement répandus au point d'apparaître banals, force est de constater que les idées pédagogiques révolutionnaires des travaux de Papert et de ses collègues ne sont toujours pas entrées dans les pratiques pédagogiques actuellement : les "apprentis physiciens" sont toujours et encore dans un rapport asymétrique avec les savoirs et les outils proposés, destinataires des *feed-back* des enseignants ou des outils numériques, mais rarement auteurs de ces boucles rétro-actives de manière à pouvoir proposer leur propre interprétation, langage, voire même leur propre environnement d'apprentissage.

Si, du point de vue technique, le partenaire technique d'ESCALATE a effectivement ouvert l'accès à la programmation pour certains des logiciels construits, ceux-ci n'ont cependant pas été utilisés comme des *micromondes*. Dans le cas du logiciel *Marbles Move*, par exemple, la possibilité technique est incluse dans le logiciel par les informaticiens : les élèves peuvent accéder au modèle mathématique déterminant le comportement des billes à l'écran, écrit en langage *logo*, et le modifier. L'enseignant peut lui aussi intervenir sur le logiciel afin de guider l'activité des élèves, par exemple en activant ou désactivant la manipulation de certaines variables à l'écran, en présentant une, deux ou trois billes. De nombreux autres paramètres ont été prévus dans l'élaboration du logiciel afin de pouvoir intervenir dans la programmation elle-même, par exemple pour que les élèves ou l'enseignant puisse essayer d'autres modélisations de la tâche que celle proposée. Un tel usage de l'outil est ce qui permet de le nommer véritablement *microworld*. Ces fonctionnalités n'ont cependant pas été utilisées, car ni le chercheur, ni les enseignants de physique ne disposaient des compétences techniques nécessaires à une intervention sur les règles de fonctionnement de la simulation du toboggan à billes.

Une question s'est posée au moment de concevoir l'interface graphique du logiciel *Marbles Move* : faut-il offrir une représentation schématique, par exemple sous la forme de graphes, ou plutôt une représentation figurative ? Goldstone et Son (2005) investiguent les effets des outils numériques de type *simulateur* conçus pour améliorer la compréhension de la physique par les étudiants, selon que la représentation graphique met en scène les phénomènes de manière plutôt abstraite (graphes, figures géométriques, éléments graphiques proches du modèle formel utilisé) ou plutôt concrète (éléments figuratifs) ; ils concluent de leur propre recherche et de l'analyse de la littérature que les simulations numériques mettant en scène des objets concrets ou représentations figuratives sont plus à même de renforcer la construction d'une représentation de la tâche chez l'apprenant, mais moins favorable au transfert de celle-ci à l'étude d'autres tâches. Vu l'objectif du projet ESCALATE de fournir des référents et expérimentations aux éventuelles discussions argumentées des élèves, il m'a semblé plus important pour le logiciel *Marbles Move* de favoriser la construction des représentations et conceptions des élèves de la situation à analyser - le toboggan à billes - et j'ai donc opté pour une interface graphique mettant en scène des objets concrets dans un simulateur figuratif.

L'interface graphique du logiciel *Marbles Move* (voir figure 4.5 ci-dessous) comprend plusieurs parties, désignées sur la figure par des lignes noires associées à des légendes spécifiques :

— une fenêtre dont la fonction est d'afficher une représentation graphique de la situation à analyser - les billes dévalant une pente - et d'afficher une simulation vidéographique du mouvement des billes, chocs entre les billes inclus ;

— trois boutons interactifs permettant à l'utilisateur de lancer la simulation ("start"), de la mettre sur pause ("stop") ou de réinitialiser la position des billes et leur vitesse (à zéro) ;

— des curseurs interactifs dont la fonction est de permettre à l'utilisateur de paramétrer une série de variables, comprenant les masses de chacune des trois billes, l'accélération des objets en chute libre résultant de l'exercice d'une force de gravitation, les coefficients de frottement statique et dynamique

du sol, le frottement de l'air s'exerçant sur une bille en mouvement, l'angle des pentes et les hauteurs de départ où les billes sont lâchées ;

— une case à cocher pour faire apparaître ou disparaître la troisième bille, placée sur le plan horizontal ;

— trois boîtes d'affichage des vitesses des billes, que l'utilisateur peut lire lorsqu'il met la simulation sur pause ;

— une fenêtre de programmation logo, qui affiche les opérations exécutées par le logiciel en logo ou peut-être édité pour participer à la programmation du logiciel.

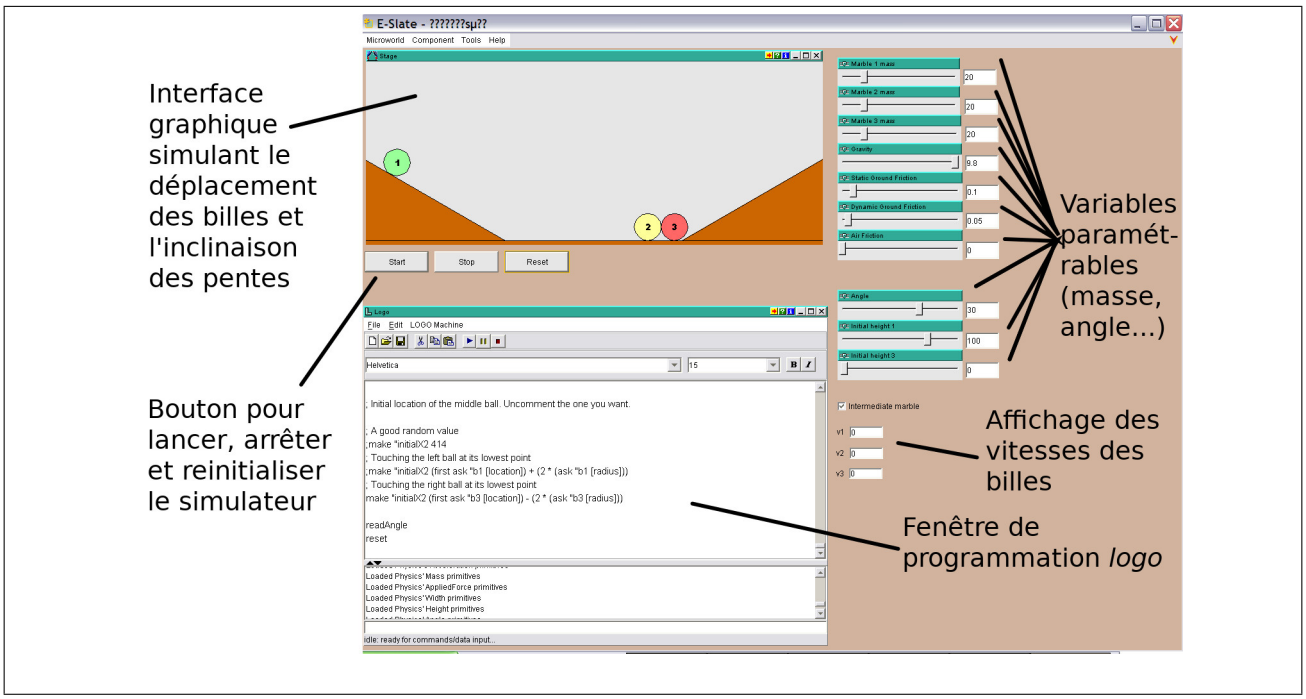


FIGURE 4.5 – Capture d'écran commentée du logiciel *Marbles Move*.

Évidemment, l'outil numérique seul ne constitue pas un dispositif d'enseignement, même *mi-fini* : c'est le détail de l'intégration des outils numériques dans un milieu didactique qui est déterminant (Riopel, Raîche, & Potvin, 2006), au final, à la fois de ses qualités pédagogiques - par l'intermédiaire des usages qu'en font les élèves - et du sens que prennent les activités effectuées par les élèves, qui interprète l'outil et les expériences qu'il permet en fonction de ce milieu.

Quel est le rôle du logiciel dans le dispositif d'enseignement mi-fini ? Dans le dispositif d'enseignement mi-fini, le logiciel *Marbles Move* est conçu pour un usage en tant qu'outil numérique de simulation, dans l'objectif de fournir une mise en scène (Béguin, 2005) permettant aux élèves de découvrir et analyser la situation du toboggan à billes. Un logiciel de ce type (pour une revue de littérature sur ce sujet voir Richoux & Salvetat, 2002) présente toujours un modèle simplifié de la réalité, et non la réalité elle-même. C'est d'ailleurs l'un de ses avantages, puisqu'il permet de visualiser ou manipuler directement des éléments symboliques ou abstraits.

Il permet, selon Vince et Tiberghien (2000), d'offrir plus de registres sémiotiques à la représentation des élèves. La tâche modélisée par le logiciel permet d'explorer le concept de *quantité de mouvement*,

et notamment d'observer le mouvement d'une ou plusieurs billes avec une parfaite conservation de cette *quantité de mouvement*. La présence de trois billes permet de retrouver l'effet intriguant utilisé par Piaget, qui a trait au fait que la bille intermédiaire reste parfaitement immobile. Des coefficients pour le *frottement* et l'*élasticité* des billes lors de leur collision ont été ajoutés afin d'aller au-delà de la conservation de la *quantité de mouvement*, constituant une situation plus complexe et plus proche des observations que les élèves peuvent faire avec un dispositif concret. En effet, la conservation de la quantité de mouvement est une simplification théorique qui se remarque facilement à l'aide du simulateur, mais nécessite plutôt un pendule de Newton pour être observée avec du matériel concret. Sur le logiciel, avec une pente des deux côté du toboggan à billes, la conservation de la quantité de mouvement permet aux élève d'observer le cas extrême d'un mouvement perpétuel : une bille descend la pente, roule sur la surface horizontale, collisionne une autre bille qui remonte de l'autre côté sur la pente jusqu'à la même hauteur et repart dans l'autre sens en répétant la transmission d'énergie indéfiniment. Chacun sait que ce mouvement perpétuel est impossible à obtenir en réalité. Le logiciel permet néanmoins aussi d'ajouter un peu de frottement pour retrouver une simulation plus réaliste. Le coefficient d'élasticité du choc se présente comme un pourcentage de l'énergie conservée lors de ce choc, et permet donc également de simuler le mouvement des billes lorsque la quantité de mouvement ne se conserve pas entièrement : à chaque collision, il y a une perte d'énergie (p.ex. en chaleur).

Un certain nombre de mesures sont directement affichées sur l'interface du logiciel (hauteur sur la pente, la vitesse, l'accélération et la force résultante), afin de permettre le lien entre formalisations algébriques ou vectorielles, c'est-à-dire de permettre aux élèves une forme d'induction à partir du modèle implémenté pour faire fonctionner le simulateur vers une modélisation algébrique ou vectorielle. Cela permet également de s'interroger sur le lien entre le mouvement des billes simulé par le logiciel, et celui qui est observé avec un dispositif concret : des différences peuvent être observées, et permettent d'interroger à la fois la modélisation faite pour le logiciel et les difficultés liées à une observation du réel dans le cadre de la physique, dont le savoir-faire comprend entre autres une activité de sélection des variables pertinentes.

En outre, le logiciel *Marbles Move* est également conçu comme un environnement d'expérimentation où les élèves peuvent pratiquer l'*inquiry learning*. Richoux et Salvetat (2002) signale également cet usage d'un logiciel :

> *La manipulation du modèle... permet une réelle investigation. (...) La suite de l'étude... peut alors consister en la recherche d'une interprétation théorique valide : à un niveau "conceptuel" par l'application de l'énoncé qualitatif de la seconde loi de Newton et celle du principe d'inertie, ou à un niveau quantitatif et mathématique par la mise en équation du mouvement dans les deux phases. Mais la suite peut aussi être la confrontation à l'expérience. Dans ce cas, il s'agit clairement de mettre en place un dispositif qui est au plus près des conditions fixées par la situation-problème.*
>
> *(Richoux & Salvetat, 2002, Annexe 2)*

Il s'agit néanmoins d'une expérimentation particulière, d'une part du fait que la formalisation de la tâche a déjà été faite pour les élèves, par exemple la traduction du *frottement* en *coefficient* au sein d'une formule

algébrique, ou le choix des variables pertinentes ; et d'autre part parce qu'elle leur permet de directement manipuler les variables avec l'interface de l'ordinateur à partir de mesures précises, par exemple d'augmenter la *masse* d'une bille avec un curseur gradué. L'expérimentation avec le dispositif concret présente diverses difficultés, liées à la séparation des variables - une bille en verre n'a pas seulement une *masse* plus grande, elle est aussi plus glissante qu'une bille en bois par exemple - et à la mesure proprement dite, qui dans bien des cas n'est pas suffisamment précise pour pouvoir trancher les débats émergeant dans les discussions des élèves. C'est pourquoi je parlerai d'*expérimentation virtuelle* pour celle qui est effectuée à l'aide du logiciel.

Idéalement, le modèle devrait donc être présenté explicitement et permettre une confrontation avec l'expérience réelle (Richoux & Salvetat, 2002), comme nous l'avons tenté dans les essais pilotes. Cependant, dans la conception du dispositif d'enseignement mi-fini, nous n'avons pas planifié de travailler avec les élèves sur le modèle lui-même, vu la complexité de la tâche représentée, préférant utiliser le temps à disposition des Travaux Pratiques pour soutenir une conceptualisation des connaissances de base de la physique (*vitesse*, *accélération* et *force*), qui posent déjà des difficultés importantes pour les élèves. C'est également la raison pour laquelle le logiciel *Marbles Move* a été utilisé comme un simulateur, les élèves n'ayant pas eu les moyens de modifier les équations régissant le mouvement des billes du logiciel pour en faire un usage de *micromonde*.

Le modèle mathématique[282] utilisé pour faire fonctionner le simulateur du logiciel a été conçu pour correspondre aux simplifications et abstractions habituellement faites en physique lors de l'enseignement de la mécanique newtonienne. Pour ne citer que quelques exemple, la surface de la pente est considérée comme parfaitement régulière, le sol comme parfaitement horizontal, le frottement est représenté par un coefficient, comme c'est le cas dans les formalisations algébriques. Ces simplifications dans l'expérience simulée et leurs effets sur l'apprentissage ont été décrits par Crowley et Schunn (2001)[283].

Les objectifs d'apprentissage spécifiquement liés à l'usage du logiciel *Marbles Move* sont les suivants :

— distinguer *vitesses* et *accélérations* des billes, notamment en construisant l'équivalence *vitesse constante* - *accélération nulle* ;

— apprendre à utiliser la *quantité de mouvement* et la *force* pour expliquer le mouvement des billes, notamment au moment de la collision, en faisant le rapport entre les changements d'accélération et l'exercice des forces sur les billes ;

— comprendre la différence entre le modèle et la réalité qu'il représente, et l'enjeu d'une modélisation qui consiste à choisir le niveau de complexité avec lequel la tâche est abordée ;

— remarquer, à travers les exercices et les interactions entre pairs, que le même phénomène peut être décrit de différentes manières, selon ce que l'un ou l'autre décide de regarder ou de conceptualiser

282. Je remercie chaleureusement Bernard Chabloz. Dr en physique, prof. à la HEP-BEJUNE et enseignant au Lycée Jean Piaget, de m'avoir fourni la modélisation nécessaire à ce simulateur, que je n'aurais jamais su élaborer seul, et que le partenaire technique du projet ESCALATE attendait des chercheurs.

283. Notamment : "when such oversimplified tasks are used in schools, students may learn a form of reasoning that is in fact antithetical to authentic scientific reasoning (Crowley & Schunn, 2001, p. 362).

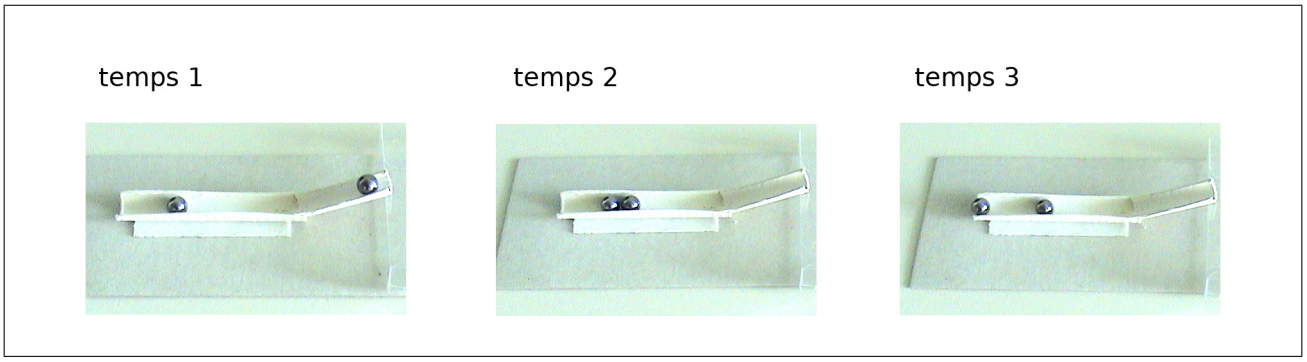


FIGURE 4.6 – Photos du dispositif concret fourni aux élèves lors de essais pilotes du logiciel *Marbles Move*.

(par exemple la description de la descente de la bille le long de la pente avec une représentation vectorielle de *forces* ou de *vitesses*) ;

— apprendre à utiliser les variables pertinentes à la question posée, le logiciel fournissant plus de variables qu'il n'est nécessaire d'en étudier pour répondre aux exercices [284].

La tâche du *toboggan à billes* et les expériences de Piaget citées ci-dessus ont également inspiré la conception de deux premières séries d'exercices (voir annexe B, figures B.1, B.2, B.3 et B.4, pp. 803-806) centrés sur des expérimentations de transmission du mouvement avec une rangée de billes sur un toboggan (voir figure 4.6 pour une photo du dispositif concret à disposition des élèves).

En classe, cependant, l'utilisation du dispositif concret mis à disposition des élèves ne peut être rigoureusement accompagné comme c'est le cas dans les entretiens piagétiens : que les élèves puissent en profiter pour faire des raisonnements semblables à ceux que Piaget et ses collaborateurs décrivent dans leurs travaux constitue donc une des hypothèses de notre ingénierie didactique. Celle-ci n'est pourtant de loin pas évidente, puisque ce sont très probablement les questions pointues et méticuleusement formulées des entretiens cliniques piagétiens qui permettent aux enfants de raisonner sur le matériel concret mis à disposition (Perret-Clermont, 1979/2000), et non pas le matériel concret tout seul, au moins dans bien des cas documentés.

Dès lors, il ne s'agit pas d'une reproduction de ces expériences mais bien d'une adaptation au contexte d'une classe, comme l'ont fait les auteurs du programme *Thinking Science* (Adey, Shayer, & Yates, 1989/2001), ce qui a des conséquences même au niveau du matériel lui-même. En effet, hors du cadre de l'entretien clinique, le jeu avec des billes ne permet pas de voir une parfaite immobilité des billes intermédiaires, en raison de nombreux facteurs minimes mais incontrôlables hors d'un laboratoire : en raison du frottement sur la surface où les billes roulent, de l'inclinaison de cette même surface qui n'est jamais parfaitement horizontale, de l'inertie rotationnelle des billes, etc. une bille n'est jamais tout à fait immobile sur une table, du moins guère plus longtemps que quelques instants fugaces.

284. Contrairement à de nombreux exercices papier-crayon, où les informations fournies sont toutes pertinentes, ce qui a pour effet que dans la plupart des cas il suffit à l'élève de savoir les articuler les unes avec les autres - typiquement avec l'unique formule qui traite cet ensemble de variables - pour donner la réponse correcte, sans passer par aucune représentation ni modélisation de la tâche au sens d'un savoir de physique.

Je fais l'hypothèse, dans cette conception du dispositif d'enseignement mi-fini, que cette difficulté peut être surmontée par la possibilité d'expérimentations virtuelles à l'aide du logiciel *Marbles Move*. En effet, celui-ci a permis la programmation du simulateur du mouvement des billes à partir d'un modèle mathématique où ces billes se comportent à l'écran d'une manière qui correspond aux lois de la cinématique et de la mécanique newtonienne. Selon White et Frederiksen (2005), l'usage d'outils numériques dans une démarche d'*inquiry learning* encourage la métacognition des élèves. Cette possibilité offerte par le dispositif d'enseignement mi-fini d'expérimentations virtuelles permet donc peut-être de répondre à la question problématique soulevée par l'*inquiry learning* que j'ai évoquée plus haut (voir l'analyse préalable p. 254) : "Comment peut-on à la fois prendre appui sur l'expérience quotidienne des élèves et conduire un enseignement des sciences qui permette aux élèves de s'approprier les concepts scientifiques ?" (Da Silva, 2004, p. 15) .

Certaines limites liées à la complexité de la programmation du modèle mathématique doivent néanmoins être relevées. Dans le logiciel *Marbles Move*, les simplifications suivantes ont été utilisées :

— tous les phénomènes physiques liés à la rotation des billes sur elles-mêmes ont été ignorés ;

— les billes ne roulent pas, mais glissent le long des pentes ;

— les billes, quoique représentées par des disques d'une certaine surface à l'écran, sont représentées dans le modèle mathématique comme des *points*, ce qui provoque occasionnellement des imprécisions quant au moment où deux billes entrent en collision - elles se superposaient - ce qui a été finalement corrigé par des mesures *ad hoc* dans la programmation ;

— le déroulement du temps est géré par l'ordinateur et ne correspond pas forcément au temps mesuré par les instruments de physique.

Par contre, le logiciel fonctionne bien pour représenter l'immobilité d'une bille intermédiaire lors d'une collision, ou l'arrêt de la bille percutant la suivante - comme dans le pendule de Newton - tel qu'il est attendu par les lois de Newton. Cette simplification du réel peut favoriser, chez les élèves, un *inquiry learning* qui leur permet de s'approprier la perspective de Newton visant à modéliser le comportement du objets matériels dans un système théorique formel exprimé en langage mathématique, ayant pour ambition d'en prédire les grandes lignes à l'aide des principes et rapports les plus simples possibles.

4.3.2.5 Essais pilotes du logiciel *Marbles Move*, du dispositif concret et des exercices associés

Considéré que de nombreuses difficultés peuvent émerger à l'introduction d'un logiciel dans une classe, j'ai procédé à des essais pilotes du logiciel *Marbles Move*, du dispositif concret et de la première série d'exercices décrits ci-dessus, avant de transmettre le dispositif d'enseignement mi-fini. Ces essais n'ont pas donné lieu à l'enregistrement de traces sonores ou vidéo, mais ils ont permis un premier retour qualitatif sur les hypothèses de l'ingénierie didactique relatives à l'argumentation et à l'expérimentation. Une des questions principales à laquelle j'ai cherché à répondre, est celle des ressources à mettre à disposition des élèves : faut-il mettre à disposition d'abord le dispositif concret avant de proposer le logiciel *Marbles Move*

pour éviter d'interférer avec la réflexion spontanée des élèves avec une réponse fournie par le logiciel ? Pour explorer cette question relative aux ressources opportunes, plusieurs conditions de passation sont testées. Ces essais ont permis des ajustements importants sur la base de quelques observations seulement, et présentent l'avantage d'avoir permis une adaptation du dispositif d'enseignement mi-fini au contexte spécifique de son implémentation, car ils ont eu lieu dans le même établissement scolaire que celui impliqué dans la recherche. Cette section permet de brièvement décrire le déroulement de ces essais pilotes, et les principaux résultats des observations effectuées.

Déroulement des essais pilotes.

Trois demi-classes participe aux essais pilote, pour un total de 27 élèves. Ces essais pilotes ont lieu en marge de l'activité principale de la classe : les élèves quittent la leçon pour quinze minutes par petits groupes de trois, et sont accueillis par le chercheur dans une autre salle. Là, les élèves reçoivent individuellement un questionnaire comprenant la première série d'exercices (voir annexe B, figures B.1 et B.2, pp. 803-804), et certains groupes reçoivent le logiciel Marbles Move sur un ordinateur portable, alors que d'autres un dispositif concret pour leur expérimentation, composé d'un toboggan à billes inclinable et des billes de masses différentes, et d'autres encore les deux ressources ou aucune.

Le dispositif concret comporte une pente, suivie d'un plat où se trouvent une ou plusieurs billes disposées en ligne et au contact les unes des autres. Une bille est lâchée à une certaine hauteur sur la pente, et va heurter la ou les bille(s) placée sur le plat. Pour éviter trop de déviation, la pente et le plat ont été réalisé en forme de toboggan, de manière à maintenir les billes sur une ligne. Le toboggan est en plastique, afin de minimiser le frottement. Les billes fournies ont la même taille, mais elles sont de deux matières différentes : en verre pour les plus lourdes, en bois pour les plus légères. Cette différence de matière permet d'explorer le rôle de la masse en utilisant tantôt des billes d'une ou de l'autre matière.

Au début de l'activité, le chercheur laisse les élèves librement découvrir le logiciel, le dispositif concret, ou les deux. Ensuite, il demande une explication du phénomène observé [285] par les élèves, par exemple : "Comment se fait-il qu'il n'y a que la dernière bille qui parte ?"

Vers la fin du temps à disposition, les élèves sont invités à échanger entre eux leurs solutions individuelles et, dans le mesure du possible, à se mettre d'accord sur les réponses aux questions : les élèves doivent alors répondre sur une nouvelle feuille, la même pour tout le groupe. Ce moment final de discussion et de confrontation de points de vue a été pensé comme un moment où les élèves pouvaient s'engager dans une argumentation. Dans la plupart des groupes d'élèves, les réponses fournies individuellement divergent

285. Plus il y a des billes sur le plan horizontal, plus il apparaît clairement que les billes intermédiaires ne bougent pas. En réalité pourtant, ces billes intermédiaires bougent toujours au moins un peu, mais plus elles sont nombreuses et plus leurs masses conjointes sont élevées, plus elles paraissent immobiles. Quoiqu'il en soit, le mouvement de la dernière bille de la rangée est un mouvement qui se distingue clairement : elle quitte la rangée à la vitesse de la bille qui est venu la percuter à l'autre bout. Parfois un incident fait sortir une bille du toboggan, ou de petits mouvements résiduels des autres billes apparaissent, mais l'expérimentation est en principe assez prévisible.

effectivement les unes des autres, et les élèves se sont engagés dans des discussions argumentées de leur solution.

L'essai avec la troisième demi-classe est effectué avec un questionnaire légèrement modifié (voir annexe B, figures B.3 et B.4, pp. 805-806) : l'exercice identifié lors des essais précédents comme le plus difficile a été placé à la fin (l'exercice "Vb"). De plus, les phrases à évaluer sur l'élan et la loi de Newton sont données après les exercices, comme proposition d'explication. Si les élèves ne se sentent satisfait par aucune de ces deux explications pour rendre compte de leurs réponses aux exercices, ils peuvent écrire leur propre proposition.

Observations des effets des conditions de passation.

Le fait de faire passer les élèves par petits groupes auprès du chercheur lui a permis de procéder à des observations directes des élèves travaillant à cette activité. Voici quelques résultats issus de ces observations, selon les conditions dans lesquelles travaillent les groupes.

Les groupes sans logiciel ni dispositif concret passe à côté de la réponse attendue, des réflexions pertinentes. En général, ils se découragent rapidement et les éventuelles conversations argumentées ne durent pas : les élèves passent à l'exercice suivant. Si le problème semble bien compris par les élèves, le manque de moyens à disposition pour tenter de le résoudre fait que l'activité tourne court. Cette condition de passation des essais pilotes montre qu'il ne suffit pas d'avoir une question qui suscite l'intérêt des élèves, et qu'il est indispensable de fournir des ressources aux élèves pour qu'ils trouvent la confiance et les moyens de résoudre le problème posé. Par exemple, à l'exercice 2 où s'agit de décider quelle est la vitesse de la bille percutée après le choc, les élèves restent tous dans cette condition de passation à une solution erronée qui consiste à calculer la moyenne des vitesses des deux billes, malgré leur observation ou intuition quant au transfert de la totalité de *quelque chose* de la première bille à la seconde.

Les groupes sans logiciel mais disposant du dispositif concret observent et reproduisent ce qu'ils voient sur le questionnaire, la plupart du temps sans même se poser le problème d'une éventuelle divergence de point de vue lorsque l'un ne voit pas la même chose que l'autre. Dans cette condition de passation, l'observation attentive du fonctionnement du dispositif concret semble se substituer à la réflexion pour les exercices donnés.

Les groupes disposant du logiciel mais sans dispositif concret travaillent passablement à obtenir sur le logiciel une configuration exactement similaire à la consigne de l'exercice présentée dans le questionnaire. Par exemple, les pentes qui s'inclinent automatiquement des deux côtés dans la première version du logiciel les gênent, car sur le schéma de l'exercice du questionnaire il n'y a de pente que d'un côté. Cette manière de procéder par mimétisme semble leur permettre d'éviter de devoir réfléchir aux nombreuses variables de la tâche et à leurs rôles respectifs, c'est-à-dire de procéder à l'analyse de la tâche et d'en extraire les éléments pertinents pour une modélisation de la situation du toboggan à billes. Dans le temps imparti, les élèves sous cette condition de passation ne parviennent pas à distinguer les variables qu'il faut contrôler et

celles qui n'ont aucune influence sur la réponse à la question. L'observation elle-même de ce qui se passe dans le logiciel semble une tâche nécessitant toute leur attention.

Les groupes disposant à la fois du logiciel et du dispositif concret du toboggan à billes ont l'occasion d'observer des comportements différents avec le dispositif concret de ceux représentés par le logiciel. Les élèves remarquent effectivement ces divergences, ce qui suscite des discussions argumentées au sein des groupes. L'argument principalement utilisé est néanmoins un argument d'autorité : les élèves préfèrent se fier aux mouvements des billes affichés sur l'écran qu'à leurs observations du matériel concret. Le logiciel semble fonctionner comme une référence, à la manière d'un manuel d'enseignement. Le logiciel étant fourni par le chercheur, il en hérite peut-être le statut, comme les livres fournis par l'enseignant acquièrent le statut de savoirs scolaires établis. Cependant, cette vérification par le logiciel n'est pas toujours si aisée : le paramétrage des simulations lancées dans le logiciel leur donne du fil à retordre, ce qui a pour effet d'affaiblir l'argument d'autorité : il ne passe pas facilement pour une vérification de leur résultat. Comme les autres groupes, ces groupes tentent de reproduire les conditions exactes spécifiées dans la consigne du questionnaire pour répondre sans passer par une modélisation de la situation du toboggan à billes, coûteuse sur le plan cognitif, mais dans cette condition de passation ils y parviennent moins facilement, car le double dispositif (concret et sur logiciel) multiplie le parasitage par des détails qui, d'une certaine manière, invite les élèves à s'interroger sur les observations ou variables qu'ils faut prendre en compte et celles qui peuvent être ignorées : c'est un premier pas vers une activité de modélisation en physique.

Observations des activités des élèves.

Ces essais pilotes étant particulièrement peu dirigés par la consigne ou les questions posées, ils offrent l'opportunité au chercheur d'observer des cheminements de pensée spontanés des élèves confrontés aux ressources mises à disposition. Les élèves tentent souvent de trouver une astuce, comme de choisir l'unique grosse bille fournie avec le dispositif concret pour en comparer le comportement avec une bille de taille standard, ou de trouver le paramétrage du logiciel correspondant parfaitement au schéma du questionnaire. Cette recherche d'astuce prend le pas sur le raisonnement scientifique espéré. Les élèves ne se posent pas la question, par exemple, de savoir quelles sont les variables en jeu dans la situation à analyser. Ils s'inquiètent encore moins de différencier entre ces variables celles qui sont plus importantes que les autres pour déterminer, par exemple, la vitesse des billes.

Par ailleurs, l'observation - que ce soit à l'aide du logiciel ou du dispositif concret - n'est pas une pratique aisée pour les élèves, et ils ne parviennent pas, pour la plupart, à en faire un usage expérimental et systématique. En conséquence, le moindre détail dans le dispositif les conduit occasionnellement en erreur : ils peinent à comparer les hauteurs atteintes sur les pentes par les billes après le choc parce que la pente est plus longue d'un côté de l'interface graphique du logiciel que de l'autre, le petit espace apparaissant entre les billes dans le logiciel les interpelle alors qu'il s'agit d'une imprécision graphique due à la programmation, etc. Ces détails sont à l'origine de discussions peu structurées entre les élèves, dont ils ont de la peine à ressortir la moindre conclusion. Ils semblent également avoir beaucoup de peine à

faire abstraction de certaines composantes de la tâche pour se concentrer successivement sur l'une seule ou l'autre et les examiner systématiquement.

L'évaluation des phrases demandée par le questionnaire *après* les exercices a mis en évidence que les élèves répondent généralement selon les attentes d'une physique newtonienne. Pourtant, des décalages apparaissent entre leur propos à l'oral dans les échanges au sein du groupe et les explications écrites, qui sont souvent plus simplistes. Les discussions abordent fréquemment des questions plus complexes et les contenus avancés et pertinents abordés dans de telles discussions, semblent presque toujours "oubliés" par la suite, au moment d'écrire une réponse au questionnaire. Cette observation met en évidence l'importance que peut avoir une justification ou une explication écrite dans le dispositif d'apprentissage, mais aussi la difficulté des élèves de passer de réflexions effectuées en groupe à l'oral à une réponse écrite individuelle.

Observations relatives aux savoirs scolaires évoqués à travers la tâche.

Les essais pilotes n'orientant pas les questions sur des concepts choisis de physique, j'ai pu observé une diversité de savoirs évoqués par les groupes qui ont conduit leur réflexion suffisamment loin pour évoquer des concepts de physique. Ces concepts ont souvent été évoqués sans forcément disposer du vocabulaire technique du domaine, mais en discutant le problème de fonds. C'est donc mon observation de chercheur qui permet d'établir ce lien, voire dans certains cas mes échanges avec les élèves à l'issue de l'activité.

Un groupe soulève explicitement une divergence entre les observations des billes effectuées à l'aide du logiciel et celles effectuées à l'aide du dispositif concret, ce qui leur a permis de découvrir le problème du *moment d'inertie* : une partie de l'énergie (potentielle) a été utilisée pour accélérer la rotation ; le point matériel est davantage accéléré que le solide rigide. Cette différence peut être constatée lors de l'observation des collisions entre billes concrètes, mais pas sur l'écran car le logiciel n'a pas inclus ce niveau de détail dans son modèle mathématique. Sans être encore une activité de modélisation par les élèves, il s'agit au moins d'une activité métaréflexive leur permettant de prendre conscience de l'existence d'un modèle - d'abord *physique* puis également *mathématique* - dans le logiciel qui opère, inévitablement, des simplifications par rapport au phénomène réel.

Un autre groupe s'est intéressé à travers le dispositif concret au concept de *quantité de mouvement*, en mettant en évidence un problème résultat de leur notion initiale d'*élan*, qu'ils n'ont pas réussi à définir clairement de manière à expliquer le phénomène de collision entre les billes.

Un troisième groupe a retrouvé la troisième loi de Newton, le principe énonçant qu'à l'exercice d'une force correspond une force de réaction de même direction et intensité et de sens opposé.

Ces quelques observations montrent que le logiciel *Marbles Move* ou le dispositif concret ne suffisent pas à conduire les élèves sur des savoirs spécifiques. Les trois groupes ayant produit les explications les plus abouties ont chacun abordé des savoirs différents. Si le toboggan à billes semble effectivement avoir le potentiel de fonctionner comme une situation d'analyse sur laquelle peuvent converger des analyses à

l'aide de divers concepts de la physique, les ressources proposées aux élèves dans les essais pilotes (dispositif concret, logiciel et première série d'exercices) se révèlent insuffisantes au cadrage de l'activité cognitive des élèves et offrent, en l'état, un milieu didactique trop ouvert pour permettre les apprentissages souhaités.

Observations des réponses aux exercices.

Le tableau 4.1 (voir ci-dessous) présente le taux de réponses correctes aux trois questions du questionnaire (les "situations 1", "situation 2" et "situation 3" de la première série d'exercice, disponible en annexe, pp. 803-805) par élèves en fonction des diverses conditions de passation, du genre, puis par comparaison entre les résultats individuels et les résultats par groupe. Le même tableau présente aussi le pourcentage d'élève par catégorie ayant répondu correctement à la question la plus difficile de la série d'exercice (correspondant à la "situation 2" de la figure B.2, p. 804 ou à la "situation 3" de la figure B.3, p. 805), où les élèves devaient donner la vitesse de la bille qui part après la collision égale à la vitesse de la bille qui entre en collision. La part des élèves ayant trouvé cette réponse correcte fournit l'indicateur le plus discriminant de la performance des élèves au questionnaire. Le nombre (N) indique tantôt le nombre d'élèves (25 en tout), tantôt le nombre de groupes (9) concernés par les mesures, ces derniers regroupant les mêmes élèves.

La première partie du tableau 4.1 présente des taux de réussite et un pourcentage d'élèves donnant la réponse correcte à la question la plus difficile qui varient selon les conditions de passation. Si le dispositif concret semble apporter une aide pour répondre à la question 3, il peut même conduire les élèves en erreur sur les autres questions : c'est que l'observation n'est pas si aisée avec ce dispositif, comme nous l'avons déjà souligné (les billes ne restent jamais tout à fait immobiles, etc.). Ce résultat va dans le sens de l'observation faite en classe : le dispositif concret confronte les conceptions des élèves avec un phénomène étonnant, sans pour autant leur donner le moyen de dépasser cette "déstabilisation" de leurs attentes.

Conditions de passation	Taux de réussite	Réussite à la question 3	N
- ni logiciel ni dispositif concret	1,4	7%	14
- seul. dispositif concret	0,7	33%	3
- seulement le logiciel	2,0	66%	3
- logiciel et dispositif	2,3	80%	5
Autres variables	Taux de réussite	Pourcentage d'élèves	
- en groupe	1,9	55%	9
- en individuel *tous*	1,3	24%	25
- en individuel *filles*	1	27%	15
- en individuel *garçons*	1,75	20%	10

TABLE 4.1 – Questionnaire soumis lors des essais pilote : taux de réussite aux trois questions et pourcentage d'élèves qui ont réussit la $3^{ème}$ question, selon les variables.

Légende : le taux est compris entre 0 (trois réponses fausses) et 3 (trois réponses correctes).

Le tableau montre également un taux de réussite dans la condition où les élèves sont sans aucune ressource qui est inférieur à ceux des conditions où les élèves disposent du logiciel *Marbles Move*. Les meilleurs résultats aux trois exercices avec le logiciel peuvent néanmoins aussi s'expliquer par le fait que les élèves observent la réponse sur l'interface graphique et reportent ces observations sur le questionnaire. La légère amélioration lors de la condition réunissant le dispositif concret et le logiciel fournit un indice qui va dans le même sens : dans la condition où les élèves disposent des deux ressources, les comportements différents des billes peuvent susciter une réflexion quant à la modélisation du toboggan à billes qui augmente les performances des élèves dans l'ensemble et tout particulière à la tâche la plus difficile (l'exercice 3). Si, dans cette condition de passation, les élèves se contentaient d'observer soit le dispositif concret soit le logiciel, les résultats se seraient situés entre ceux des conditions (1) avec dispositif concret et (2) avec le logiciel seulement. Or, ce n'est pas le cas.

En conclusion de l'examen de ces conditions de passation, les essais pilotes montrent l'importance pour les élèves de disposer de ressources diverses - et pas systématique congruentes - pour stimuler une réflexion leur permettant de faire de la tâche une activité d'apprentissage. Sinon, les élèves peuvent soit manquer de ressource pour dépasser l'étonnement suscité par le phénomène présenté à l'aide du toboggan à billes, soit se contenter de reproduire ce qu'ils observent sans réfléchir

Jusque là nous avons examiné les résultats lors du travail individuel des élèves, dans la première phase de l'activité. Progressent-ils lors de la deuxième phase, en discutant en groupe ? Globalement, le taux de réussite augmente (de 1,3 à 1,9) et la part des individus ou, respectivement, des groupes donnant une réponse correcte à la question difficile augmente aussi (de 24% à 55%). Cette augmentation globale ne permet cependant pas de savoir si le groupe a choisi la meilleure réponse individuelle dans le groupe sans discuter, ce qui correspond à une résolution sociale du *conflit socio-cognitif* connue dans la littérature (voir p.ex. : Pérez, Mugny, Maggi, & Butera, 1995) pour être souvent préférée, car elle est moins coûteuse sur le plan cognitif, ou si les élèves se sont engagé dans des discussions argumentatives et ont fait évolué leurs

représentations individuelles[286]. Pour l'exercice 1, les résultats montrent que c'est la meilleure solution que les élèves retiennent parmi les diverses réponses au sein d'un groupe, mais ce n'est pas le cas pour les deux autres questions, plus complexes. Dans bien des cas c'est une solution moins satisfaisante qui est retenue par les élèves. Ceci s'explique peut-être du fait que les lycéens n'ont pas tellement argumenté ou même discuté les réponses à donner, et l'observation laisse penser que les divergences ont été résolues sur le mode relationnel (la personne de confiance pour la physique, ou celle qui paraît la plus assurée de sa réponse, etc.).

Cette résolution sociale du conflit ou des divergences d'opinion repose fréquemment sur le statut social des interactants, et Zapiti et Psaltis (2012) ont montré l'importance du genre comme statut conduisant les groupes d'élève à privilégier les réponses données par les garçons à celles de filles. En examinant les performances individuelles selon le genre, on obtient effectivement un indice supplémentaire quant à la part de résolution sociale des divergences : le tableau affiche un taux de réussite des garçons en individuel qui est proche de celui des groupes, alors que celui des filles est nettement inférieur. Il est dès lors probable que, globalement pour l'ensemble des exercices et pour l'ensemble des groupes, les réponses des garçons aient prévalu sur celles de filles pour former les réponses des groupes, dont la majorité (7/9) étaient mixtes.

Par contre, cette hypothèse ne fonctionne pas pour la question la plus difficile. En effet, le tableau montre une part des filles et des garçons qui réussissent cette question en individuel qui est proche (27% contre 20%), voire légèrement en faveur des filles. Or, cette part monte à 50% dans les groupes, toutes conditions de passation confondues, c'est-à-dire qu'il y a une performance nettement meilleure pour les deux catégories, filles et garçons. Cette augmentation nous permet de présumer que des échanges, éventuellement argumentés, ont permis aux élèves de faire évoluer leur réflexion.

En conclusion, la difficulté des questions posées - et un haut niveau taxonomique (Bloom, 1956) ne permettant pas de simplement reporter des observations pour fournir les réponses attendues - constitue un paramètre important des tâches dans l'objectif de susciter des discussions argumentées entre élèves. Les divergences entre individus sur les questions plus simples conduisant à une résolution sociale qui semble ne pas fonctionner pour la question la plus difficile. En outre, ces essais suggèrent qu'il ne suffit pas d'exiger une réponse commune au groupe, à rendre sur un seul exemplaire de questionnaire, pour mettre les élèves en discussion, même lorsque ceux-ci ont effectivement des avis différents. La nature de la tâche et l'ensemble du milieu didactique joue un rôle important dans cet objectif.

Dans les quelques résultats de ces essais pilote, nous avons des éléments qui vont dans le sens d'une confirmation de la pédagogie d'ESCALATE : la possibilité d'*inquiry learning* (sur des questions suffisamment complexes) suscite davantage de discussions, et celles-ci permettent une augmentation des performances des élèves. C'est même la double possibilité d'expérimentations concrètes avec le dispositif du toboggan à billes et d'expérimentations virtuelles avec le logiciel qui semble la plus prometteuse, puisque

286. Cette alternative est un peu grossière et devrait être enrichie des résultats des travaux sur la construction d'une intersubjectivité dans les situations de test (Grossen, 1988 ; Nicolet et al., 1988), ou montrant l'importance d'une relation socio-affective positive entre les interactants (Sorsana, 1999). Je n'ai cependant pas les moyens empiriques de discuter ces dimensions dans le cadre de ces essais pilotes.

les performances y sont les plus élevées, et que c'est également dans cette condition que j'ai observé le plus d'échanges argumentés entre élèves.

Ces résultats ne permettent évidemment pas de présumer des apprentissages effectivement réalisés par les élèves, et ne peuvent conduire à une généralisation en raison du faible nombre de participants. Ils nous fournissent néanmoins de précieux renseignements qualitatifs pour la démarche d'ingénierie didactique en cours, de manière à guider les choix de conception au mieux. Nous savons désormais que les élèves observent le mouvement des billes sur le logiciel en lui attribuant une autorité épistémique, que les divergences entre ces observations et celles du dispositif concret stimule la discussion entre élèves lorsque ceux-ci doivent se mettre d'accord pour fournir une réponse commune, et que les questions complexes présentent moins le risque de résolution sociale des divergences, et que les expérimentations proposées sur la tâche du toboggan à billes fournissent effectivement des matériaux [287] pour des discussions argumentées sur des savoirs variés de physique (quantité de mouvement, inertie rotationnelle, force de réaction, etc.). Les essais pilotes indiquent également que le travail en groupe, dans un deuxième temps de l'activité, entraîne globalement de meilleures performances que celles du premier temps, en individuel. Néanmoins, nous ne sommes pas du tout en mesure de dire, à l'aide de ces quelques observations, si l'augmentation de la performance aux exercices indique un apprentissage de la part des élèves, et en particulier des connaissances conceptuelles ou de la modélisation visées par la physique.

4.3.2.6 Modifications apportées après les essais pilotes : le dispositif d'enseignement mi-fini

Les essais pilote mettent en évidence la pertinence de la tâche choisie - le toboggan à billes - pour stimuler des discussions sur divers concepts de physique dans l'approche pédagogique d'ESCALATE, et l'importance des outils comme le logiciel *Marbles Move* et le dispositif concret. Mais ces essais montrent également la nécessité de guider les élèves vers les savoirs de physique : si des discussions intéressantes émergent d'une activité aussi ouverte que celle des essais, les élèves ne parviennent pas sans aide à aboutir à une explication ou même à une réponse transmissible à l'enseignant, ce que montre l'appauvrissement des propos lors du passage à l'écrit effectué par les élèves. Par ailleurs, la tâche choisie permet d'aborder des concepts différents et les groupes d'élèves sont partis spontanément dans des directions variées, ce qui peut conduire l'enseignant à une situation ingérable dans une salle de classe, même avec seulement une douzaine d'élèves pour des Travaux Pratiques. En outre, l'orientation vers des savoirs précis est plus ou moins pertinente en fonction des possibilités d'expérimentation offertes, ce que les élèves ne parviennent souvent pas à envisager. Il est donc de la responsabilité du concepteur du dispositif d'enseignement et de la séquence d'enseignement de veiller à cette adéquation entre les savoirs visés et les possibilités réelles d'*inquiry learning* offertes avec les ressources mises à disposition.

287. Nommés *evidence* dans la littérature anglaise de l'argumentation, terme que je préfère remplacer par *référent* par cohérence avec la théorie du signe de Grize introduite plus loin mais aussi pour éviter de laisser penser que les faits se donnent à voir à l'observateur : il est en effet courant que les élèves ne sont pas d'accord sur ce qu'ils perçoivent, autrement dit les *evidence* n'ont rien d'évident comme l'emprunt de l'anglais au français le laisserait faussement entendre.

Ces résultats vont dans le sens de cette remarque de Mayer (2004) au sujet d'une conception constructiviste de l'apprentissage, qui se distingue à la fois de l'enseignement structuré à la prussienne et de l'activité non-dirigée, dans une posture intermédiaire de "découverte guidée" :

> *Overall, the constructivist view of learning may be best supported by methods of instruction that involve cognitive activity rather than behavioural activity, instructional guidance rather than pure discovery, and curricular focus rather than unstructured exploration."*
>
> *(...)*
>
> *"In many ways, guided discovery appears to offer the best method for promoting constructivist learning. The challenge of teaching by guided discovery is to know how much and what kind of guidance to provide and to know how to specify the desired outcome of learning.*
>
> *(Mayer, 2004, pp. 14 & 17)*

Le défi de cette approche, relève Mayer, consiste à "savoir combien et quel genre de guidage fournir" en fonction des objectifs d'apprentissage. C'est précisément pour affiner ce guidage que j'ai procédé à des essais pilotes, permettant ensuite une première amélioration du dispositif d'enseignement mi-fini.

A l'issue de ces essais, j'ai décidé de rédiger une nouvelle série d'exercices permettant un guidage plus spécifique de l'activité des élèves (voir annexe B, figures B.5 à B.14, pp. 807-816). Cette deuxième série d'exercices[288] a été conçue pour une mise en séquence plus aboutie du logiciel *Marbles Move* dans le dispositif d'enseignement mi-fini. Les principales révisions consistent à susciter une description à l'aide des concepts de cinématique et de mécanique de plusieurs moments du mouvement des billes par les élèves, au lieu de se concentrer uniquement sur la collision entre les billes, et de ne demander aux élèves de ne décrire qu'une seule bille à la fois au moment de la collision. Par ailleurs, les questions sont moins orientées et laissent les élèves libres d'explorer les rapports entre les exercices.

Les élèves sont invités à travailler par groupes de 3 avec une seule feuille d'exercices, dans le but de faire émerger des discussions spontanément au sein des groupes. Toutes les ressources sont mises à disposition des élèves, qui disposent par groupe d'un ordinateur portable avec le logiciel *Marbles Move* et d'un dispositif concret du toboggan à billes. L'activité argumentative entre groupes, permettant de confronter leur solution éventuellement divergentes, est suggérées pour une phase ultérieure de la séquence où le logiciel *Digalo* peut jouer le rôle d'outils de médiation.

Cette deuxième série d'exercices s'est inspirée[289] de Tiberghien et de Vries (1997), qui montrent comment une activité sur ordinateur, en présentiel ou à distance, peut être utilisée comme ressource pour nourrir des discussions (négociations, explications et argumentations) entre pairs. En effet, les deux principaux objectifs de l'usage de ces outils numériques par les élèves pour le dispositif d'enseignement mi-fini sont :

288. Les exercices ont encore fait l'objet d'une légère révision après leur utilisation avec la première demi-classe (A), ce qui explique la présence de deux versions en annexe : une version pour la première demi-classe (A) et une version pour la seconde demi-classe (B).

289. Elle a également bénéficié des précieux conseils d'Andrée Tiberghien, qui m'a généreusement reçu à Lyon dans ce but en été 2006, que je tiens tout particulièrement à remercier ici.

— que les élèves puissent effectuer des expérimentations virtuelles qui, sur certains points, contrastent avec les expériences concrètes ;

— que ces outils - et notamment les expérimentations citées ci-dessus - nourrissent des échanges argumentés entre élèves.

Cette deuxième série comporte une séquence d'exercices permettant aux élèves d'explorer progressivement la situation du *toboggan à billes* à l'aide de concepts de la physique liés entre eux (mouvement, vitesse, accélération, force), mais présentés de manière incrémentale pour faciliter leur différenciation dans le raisonnement des élèves. Le premier exercice demande une description du mouvement des billes lorsque le simulateur et lancé, et la mise en page exige des élèves qu'ils découpent le mouvement des billes en plusieurs phases. Le découpage attendu de ces phases du mouvement s'est inspiré des *facettes* des connaissances acquises par les élèves que Tiberghien (2007) met en évidence dans une tâche d'analyse du choc entre les billes à l'aide du concept de *force*. Elle souligne en particulier "l'importance de la vitesse dans la construction du sens de la deuxième loi" (Tiberghien, 2007, p. 8, traduit par l'auteur).

L'hypothèse sous-jacente à la séquentialisation des exercices dans cette deuxième série consiste à faire le pari qu'une meilleure compréhension du concept de *force* peut être construite par les élèves si ceux-ci sont amenés à utiliser dans l'analyse de la même situation du *toboggan à billes* les concepts précédemment étudiés et apparentés pour les mettre en relation les uns avec les autres, notamment, dans ce cas : l'*accélération*, en tant que changement de *vitesse*, la *vitesse* et le *mouvement* et le *repos*.

White (1993) utilise également un micromonde pour amener de manière progressive le concept de *force* aux élèves, dans un premier temps comme ayant un effet d'augmentation de la *vitesse*, et ensuite comme cause "plus complexe et abstraite" (*idem,* p. 17) de l'*accélération*. La séquence des exercices proposés dans le dispositif d'enseignement mi-fini est légèrement différente : plutôt que d'aborder d'emblée le concept de *force*, qui est nouveau pour les élèves, les premiers exercices apparaissent comme des exercices de répétition des concepts supposés déjà connus (*mouvement*, *vitesse*, *accélération*) sur la situation du *tobbogan à bille*, de manière à ce que cette situation permettent aux élèves de construire des liens avec le concept nouvellement introduit (*force*) sans devoir effectuer de *transfert*[290] (voir p.ex. : Aebli, 1951 ; Tiberghien, 2003) d'une situation à analyser à une autre. Cette séquentialisation des exercices constitue une tentative de réponse pragmatique à la confusion des élèves, souvent constatée par les chercheurs et les enseignants, entre *accélération* et *force* : je fais l'hypothèse que le fait d'aborder ces concepts dans la description d'une même situation favorise la différenciation par les élèves de ces deux concepts.

La série d'exercices à réaliser avec le logiciel *Marbles Move* du dispositif d'enseignement mi-fini ne sont pas donnés avec une indication temporelle contraignante. Le temps à disposition des élèves est prévu pour être adapté en fonction de leur besoin, au fil de l'exploration du toboggan à billes, dans le cadre

290. Vergnaud et al. (1978) montrent en détail les problèmes que pose le découpage des savoirs scolaires, les contingences historiques du développement de ces savoirs, leur acquisition par les élèves dans des tâches distinctes et, surtout, les relations souvent impensées entre ces trois composants. L'article fournit notamment un exemple portant sur la situation du *tobbogan à bille* d'une réponse d'enfant paraissant saugrenue, si on fait justement l'économie des rapports complexes qu'évoquent les auteurs.

des limites institutionnelles. Ce choix va dans le sens d'une prise en compte du problème des inégalités entre filles et garçons dans la motivation et l'accès aux filières d'étude techniques, en particulier dans les branches mathématiques et physiques : Coradi et al. (2003) montrent que la question du rythme est l'un des ressorts de la discrimination des filles dans ces domaines. Il ne s'agit évidemment pas de faire l'hypothèse, trop simpliste, que les filles ont besoin de plus de temps parce qu'elles seraient plus lentes à comprendre ces domaines. La discrimination constatée s'articule plutôt sur la valorisation de performances scolaires favorisant un apprentissage superficiel des contenus enseignés, auquel les garçons s'adaptent peut-être plus facilement ou plus volontiers - au détriment de leurs réelles acquisitions de compétences - alors que les filles s'accommoderaient mieux de processus d'apprentissage plus exigeant, pour lesquels le système scolaire ne donne pas les conditions adéquates et que les systèmes d'évaluations pratiqués ne valorisent pas. Nous y reviendrons dans la discussion des résultats.

Ce choix de conception est également cohérent avec la conception constructiviste de l'apprentissage, comme le résume précisément (Tiberghien, 1997) :

> *The evolution of students' understanding is supposed to follow this sequencing ; the rhythms of teaching and learning should be about the same. (. . .) . . . we propose another approach. (. . .) In this perspective, the differentiation between teaching and learning is important since only teaching can be modified, whereas learning, according to the constructivist hypothesis, is largely the responsibility of the learners." "To characterise teaching, we propose three main aspects : the knowledge to be taught, the sequencing and the mise en sctne, the latter being how this knowledge is "staged" during the teaching situations. (. . .) The knowledge to be taught is more than reformulating the scientific knowledge, it can be a transformation under the constraints of the educational system (Chevallard, 1991)*
>
> *(Tiberghien, 1997, p. 360)*

La distinction entre *rythme d'enseignement* et *rythme d'apprentissage* est essentielle à cette conception du passage de l'activité prescrite par l'enseignant à une activité effective, cognitive et - si tout va bien - *d'apprentissage* de l'élève. Confondre les deux rend les processus d'apprentissage invisibles à l'observation, le déroulement de l'enseignement occultant le déroulement des acquisitions des connaissances par les élèves, déroulement qui se décline en autant d'histoires différentes qu'il y a d'élèves engagés dans les activités.

4.3.2.7 Usages et effets attendus du dispositif d'enseignement mi-fini

Dans cette section, je résume les hypothèses incarnées dans le dispositif d'enseignement, au sein de l'*ingénierie didactique* (Artigue, 1988). Le dispositif d'enseignement mi-fini dans son ensemble, outils numériques inclus, reprend à charge d'hypothèse les caractéristiques d'un dispositif d'apprentissage favorable à l'émergence d'une activité argumentative issues des recherches précédentes (voir p.ex. : Driver et al., 2000 ; Schwarz & Glassner, 2003 ; Simon, Erduran, & Osborne, 2002, 2006).

I. Le principal effet attendu dispositif d'enseignement mi-fini est d'engager les élèves dans des expérimentations concrètes ou virtuelles, et de faire émerger des discussions entre élèves, et plus particulièrement des interactions orales ou écrites comprenant des *arguments* en faveur des *positions* adoptées dans la réponse aux questions posées par les tâches scolaires.

Plus spécifiquement à l'*inquiry learning*, je fais l'hypothèse que le fait de disposer d'un logiciel Marbles Move par groupe permet aux élèves des expérimentations virtuelles qui les stimulent à s'engager dans des discussions et de nouvelles *enquêtes* - au sens de l'*inquiry learning* - en configurant le logiciel pour permette des nouvelles expérimentations.

Plus spécifiquement à l'argumentation produite par les élèves, je fais l'hypothèse de voir apparaître des argumentations dans lesquelles les expérimentations concrètes ou virtuelles des élèves fournissent des références et des arguments en faveur de leur position dans le débat.

II. Au niveau des interactions sociales, je m'attends à ce que les élèves s'engagent collectivement dans la construction d'une intersubjectivité avec leurs pairs lors du travail sur les tâches qui leur sont transmises, notamment à travers des comportements d'écoute les uns envers les autres. Cette hypothèse repose sur le fait que l'approche pédagogique adoptée valorise les points de vue des élèves, en leur offrant une place importante dans les activités planifiées et au niveau du temps à disposition. Je m'attends donc à ce que cette valorisation ait pour effet auprès des élèves qu'ils valorisent eux aussi les divers points de vue exprimés par leurs pairs, et non seulement celui de l'enseignant, et que leurs représentations de la tâche et des contenus prennent suffisamment d'importance pour eux-mêmes pour qu'ils s'intéressent aux problèmes qui leur sont communiqués. Je m'attends également à ce que les divergences entre les élèves ne débouchent pas toujours sur un commun accord au sein des groupes, ou que les réponses écrites communes à un groupe ne soient pas toujours soutenues ou comprises par tous les membres du groupe. Je m'attends à ce que les décisions soient occasionnellement prises sur la base de relations de pouvoir au sein des groupes, que ce soit en fonction de prise de pouvoir concrète - l'élève qui tient le crayon ou le clavier de l'ordinateur (Kohler, 2010a) - ou en fonction de statuts sociaux, par exemple le statut d'expertise acquis par un élève au sein de la classe du fait de sa moyenne en physique, ou le statut lié au genre (Zapiti & Psaltis, 2012).

III. Les effets attendus sur l'apprentissage sont ceux mis en évidence par la littérature (voir p.ex. : Leitão, 2000 ; Schwarz et al., 2003) qui a montré qu'elle peut aider les élèves à s'engager cognitivement dans la résolution d'une tâche. Je m'attends donc à ce que les élèves puissent construire des connaissances plus profondes que celles qui permettent de réussir uniquement un exercice ou d'appliquer une procédure scolaire par imitation (p.ex. en utilisation une formule algébrique), notamment des connaissances conceptuelles pouvant être mobilisées dans de nombreuses tâches différentes et, en physique, dans un processus de modélisation d'une situation à analyser.

La distinction entre apprentissage *profond* et apprentissage *superficiel*, si elle demeure intuitive et relativement floue, est néanmoins exemplifiée et discutée dans les travaux de Piaget (Piaget, 1974b, 1974c) et dans beaucoup d'autres recherches, comme les travaux fondateurs sur le problème du *transfert*

des connaissances des enfants à des contextes différents (voir p.ex. : D. W. Carraher & Schliemann, 2002 ; T. N. Carraher, Carraher, & Schliemann, 1985 ; Tartas, Perret-Clermont, Marro, & Grossen, 2004) ou les travaux en didactiques des sciences sur les préconceptions (p. ex. Giordan et al., 1994).

IV. Au niveau cognitif, je m'attends à ce que le dispositif d'enseignement mi-fini induisent chez les élèves des activités consistant à identifier les variables en jeu et leur pertinence relativement à la situation du toboggan à billes et aux questions posées, à jouer avec les divergences et objections lors de l'interaction avec les pairs, à repérer les arguments et leurs sources et à construire un raisonnement collectif autour du problème posé. Au niveau identitaire, il est attendu que les élèves qui s'engagent dans une argumentation et gestion de l'image de soi, c'est-à-dire par exemple dans des stratégies permettant d'éviter le ridicule ou d'acquérir une reconnaissance sociale. Il est attendu que ces aspects ont un effet sur la tolérance à la contradiction, et d'une manière générale sur la résolution des divergences d'opinion quant à la réponse à donner au problème de physique.

V. Concernant l'usage des outils numériques en classe, je m'attends à ce que les élèves prennent en main les logiciels en explorant leurs limites et éventuelles faiblesses (bug, possibilité de détourner l'outil à d'autres fins, etc.), mais que cela n'empêche pas les élèves de s'engager dans les activités prévues. Je compte sur la robustesse de l'outil et les essais pilotes du logiciel *Marbles Move* pour que cette exploration prenne le moins de temps possible en classe. Concernant plus spécifiquement *Digalo*, si l'enseignant décide de l'utiliser dans la séquence, je fais l'hypothèse que les élèves se basent effectivement sur leurs conceptions personnelles pour interagir à travers le logiciel. Si de telles argumentations ont lieu, je m'attends alors, à l'instar des résultats des analyses microgénétiques du discours argumentatifs des élèves de Von Aufschnaiter, Erduran, Osborne, et Simon (2007) [291], à ce que ces activités permettent aux élèves de consolider leurs connaissances de la physique et d'élaborer les concepts scientifiques étudiés à un plus haut niveau d'abstraction.

La seconde série d'exercices conçue pour l'usage du logiciel *Marbles Move* comprend des objectifs d'apprentissage plus spécifiques, brièvement indiqués ci-dessous pour l'ensemble des tâches prévues.

La première série de tâche, intitulée "activité 1" (voir annexe B, figures B.5 B.10), consiste pour les élèves à passer d'une description événementielle (semblable à celle à la base des questionnaires des essais pilote) en termes de "avant – pendant – après la collision" à une description à l'aide des concepts de cinématique, exigeant par exemple des élèves qu'ils décrivent un "mouvement à vitesse constante". Cette activité d'observation est effectuée sans le logiciel *Marbles Move*, qui leur est fourni à partir de la deuxième leçon. Ce choix de commencer l'activité avec le matériel concret comme seule ressource est censé permettre aux élèves d'expérimenter la différence entre un environnement virtuel où le mouvement des billes est programmé selon un modèle, et la tâche avec du matériel concret. C'est une reprise du dispositif d'enseignement mi-fini et, plus particulièrement, du résultat des essais pilotes.

291. Les auteurs résument ainsi leurs résultats : "The microanalysis of student discourse showed that : (a) when engaging in argumentation students draw on their prior experiences and knowledge ; (b) such activity enables students to consolidate their existing knowledge and elaborate their science understanding at relatively high levels of abstraction. The results also suggest that students can acquire a higher quality of argumentation that consists of well-grounded knowledge with a relatively low level of abstraction." (Von Aufschnaiter et al., 2007, p. 101).

Il est demandé aux élèves de décrire le mouvement des billes (dans la version avec seulement deux billes), et d'identifier trois phases de leur mouvement, de les dessiner en représentant les billes par des points, puis de représenter leurs vitesses par des vecteurs (les élèves connaissent les vecteurs de leurs leçons de mathématiques). Dans la séquence B, la donnée de cette activité a été sensiblement clarifiée en demandant aux élèves de choisir les phases du mouvement de la bille n°1 (celle qui descend). Cependant, on ne leur demandait pas explicitement de choisir ces phases en fonction de la vitesse, afin d'observer s'ils se référaient effectivement aux caractéristiques des vecteurs de vitesse (surtout le sens et la direction) ou s'ils organisaient leurs phases autour de critères événementiels (avant le choc, le choc, après le choc).

Dès "l'activité 2" (voir annexe B, figures B.6 B.11) peuvent utiliser le logiciel *Marbles Move* pour décrire l'influence des diverses variables sur le déplacement d'une bille, qu'ils peuvent anaylser en paramétrant ces variables dans le logiciel dans des expérimentations virtuelles. Les élèves remplissent un tableau avec une ligne pour chaque variable, et une colonne pour chacune des billes, afin de d'inventorier ce qui influence la vitesse de la bille n°1 avant le choc et la vitesse de la bille n°2 après le choc. Dans la séquence B, quelques ajustements concernant la présentation du tableau ont été faits pour en faciliter la compréhension. Ce tableau une fois rempli, il leur est demandé de tirer des relations entre la vitesse de la bille n°1 avant le choc et celle de la bille n°2 après le choc : "Que faut-il en conclure ? Tenter d'écrire une formule générale ou une phrase exprimant le rapport entre la vitesse de la bille n°1 et la vitesse de la bille n°2 après le choc, qui prenne en considération la (les) variable(s) pertinente(s)". Cette réflexion peut mener les groupes à aborder la notion de quantité de mouvement de manière inductive.

"L'activité 3" (voir annexe B, figures B.7 B.12) exige des élèves de continuer la description du phénomène, mais cette fois en incluant dans l'analyse la *vitesse* et *l'accélération* : "Est-ce que la vitesse est constante ? Sinon, est-ce que la bille accélère ou décélère ?". Les exercices exigent des élèves qu'ils décrivent précisément, sous forme de dessins de vecteurs, les différentes phases du mouvement d'une bille en utilisant les grandeurs de la cinématique *vitesse* et *accélération*, et dans deux cas de figure : l'un sans frottement, l'autre avec le frottement du sol. Les élèves sont amenés à expliquer la décélération de la bille sur la surface horizontale par l'action de la force de frottement. L'objectif principal de cette activité est de distinguer clairement *vitesse* et *accélération*, et de mettre en évidence les changements[292] de valeur de ces deux grandeurs au cours des phases des mouvements des billes. Cette tâche permet également la construction par les élèves d'une description de référence à laquelle ils peuvent se reporter au moment de travailler à l'activité suivante.

"L'activité 4" (voir annexe B, figures B.8 B.13) permet d'aborder l'ensemble des forces exercées sur chacun des deux billes, en se basant sur l'exemple de l'action de la *force de frottement* sur la *vitesse* mise en évidence dans les exercices précédents ("activité 3"). Un tableau permet de représenter les principales *forces* exercées sur chacune des billes, à nouveau sous forme de *vecteurs*, et de faire la somme de ces vecteurs pour retrouver la somme des forces permettant d'expliquer leur effet sur les vitesses des billes dans les activités

292. Le mot "changement" est ambigu : il peut s'agir d'un changement "instantané" (dérivée), ou d'un changement entre deux instants distincts. Un changement "instantané" de vitesse est une accélération. Mais dans ce contexte, le changement d'accélération, lui, n'est jamais une dérivée.

précédentes. Cette tâche sollicite un dessin des forces des élèves, sur les mêmes phases du mouvement de la bille qu'aux exercices précédents de manière à susciter des liens entre ces étapes d'analyse. L'objectif principal consiste à expliquer chaque changement de vitesse, chaque *accélération* observée précédemment par l'action d'une *force* ou somme des forces. Tout à la fin, une question vise à faire faire l'analyse du choc par les élèves, comme un instant "entre" deux phases du mouvement de la bille, dont l'objectif est de permettre aux élèves d'expliquer les différences en termes de *vitesse* et d'*accélération* opérée "entre" ces deux phases. L'objectif de cette question est de faire représenter par les élèves les forces exercées sur les deux billes pendant le choc, de manière à expliquer pourquoi la bille n°1 s'arrête quand elle a la même masse que la bille n°2 : ils peuvent représenter avec les vecteurs la "force de même direction et intensité mais de sens contraire" citée dans la troisième loi de Newton (cours théorique, figure B.34, p. 864).

Une cinquième tâche, "l'activité 5" (voir annexe B, figures B.9 B.14) présente des "exercices d'application" dans le style habituel à l'établissement scolaire, mais portant spécifiquement sur les savoirs visés par dans cette série d'exercices avec le logiciel *Marbles Move*. En effet, cette série d'exercices sollicitant essentiellement des réponses qualitative jusque là, il m'a semblé opportun de donner aux élèves des exercices exigeant des calculs numériques, afin de se faire une idée de leurs compétences dans un format qui leur est familier. L'objectif d'observer si les élèves retrouvent leur niveau de performance dans une pratique familière comme celle-ci, et éventuellement s'ils parviennent à transférer quelques connaissances acquises lors des exercices avec le logiciel dans des activités scolaires plus coutumières en physique dans leur établissement scolaire.

4.4 Ingénierie didactique II : la séquence d'enseignement planifiée

Le dispositif d'enseignement mi-fini, dont la conception a été présentée ci-dessus, a inspiré à un enseignant en formation en charge d'une classe de lycée de $2^{ème}$ année (dénommé "gymnase" en Suisse) la conception d'une séquence d'enseignement pour les Travaux Pratiques (2 leçons bi-mensuelles par demi-classe) sur un semestre. Après avoir pris connaissance du dispositif d'enseignement mi-fini essentiellement au cours d'entretiens avec le chercheur, et en découvrant les outils numériques Digalo et *Marbles Move* et la série d'exercices prévues pour ce dernier, l'enseignant s'est lancé dans la conception d'une séquence d'enseignement dont l'ingénierie didactique est brièvement décrite ci-dessous. Cette ingénierie a également fait l'objet d'un travail de fin d'études[293] à la Haute École Pédagogique où l'enseignant terminait sa formation cette année-là, et qui m'a fourni l'essentiel des traces écrites permettant de reconstruire le point de vue de l'enseignant lors de la conception de la séquence. Ce texte est fréquemment cité par la suite.

Avant de présenter le travail de conception d'une séquence par l'enseignant ayant accepté de collaborer pour cette recherche, la description du contexte de l'implémentation du dispositif d'enseignement mi-fini permet de situer cette conception dans le milieu culturel et scolaire de l'établissement où l'enseignant exerce son activité professionnelle, et permet de spécifier ce qui a été repris du dispositif mi-fini, pour quels usages et dans quels buts.

4.4.1 Description du lieu de l'implémentation

La description du lieu de l'implémentation du dispositif d'enseignement mi-fini est importante pour les analyses du chapitre 6, parce qu'elle permet une description - aussi brève soit-elle - de ce que Perret-Clermont (2001) dénomme le *champ socio-culturel* - ici la culture scolaire romande de l'enseignement des sciences au secondaire II - et le *cadre du cadre* ou *contexte*, en particulier institutionnel, des situations de malentendu interprétées par le chercheur. Les interprétations des interactions sociales entre les élèves et avec l'enseignant nécessaires à la reconstruction des significations que prennent *de leur point de vue* les ressources sémiotiques et matérielles des activités de didactique des sciences étudiées reposent forcément sur l'insertion de ces interactions dans le cadre d'une situation, elle-même part d'un contexte institutionnel spécifique - l'établissement scolaire - baignant dans un champ socio-culturel donné. Ce champ socio-culturel, s'il n'est évidemment pas homogène comme pourrait le laisser penser toute tentative de description sommaire comme je propose ci-dessous, dispose néanmoins de ses tendances propres et de spécificités permettant de le distinguer à l'échelle internationale.

4.4.1.1 Description du champ socio-culturel : le système d'éducation en Suisse romande

Le système éducatif helvétique comprend quelques caractéristiques inhabituelles qui valent la peine d'être mentionnée ici, car elles exercent une influence évidente sur le contexte institutionnel de la pratique professionnelle des enseignants.

293. Ce travail est un *mémoire professionnel* intitulé "La modélisation sur ordinateur et les travaux pratiques de physique à travers les situations-problèmes pour s'attaquer aux " fausses" conceptions et représentations "erronées" chez les apprenants".

Au niveau sociologique, la Suisse présente une proportion relativement faible [294] de jeunes gens se dirigeant vers le baccalauréat académique, dénommée localement "maturité gymnasiale". En effet, les alternatives de la formation duale et/ou professionnelle sont souvent plus attractives, encouragées par la société civile et le politique, et permettent également d'obtenir un baccalauréat professionnel, dit "maturité professionnelle" permettant l'accès aux écoles du tertiaire (écoles polytechniques fédérales, p.ex.).

Au niveau politique, la Suisse se démarque de nombreux pays du fait qu'il n'existe par d'équivalent d'un "Ministère de l'éducation" au niveau fédéral de la Confédération helvétique. Le concept de *nation* correspondant dans la Constitution suisse aux *cantons* (au nombre de 26), ce sont ces entités politiques qui sont compétentes pour l'éducation des nouvelles générations [295]. Par conséquent, les programmes d'enseignement ont traditionnellement été différents d'un canton à l'autre à bien des égards (durée de la scolarité, système de sélection, calendrier et dates des vacances, etc) et ce n'est que récemment (en 2009) que la Suisse romande a signé une convention d'harmonisation (HARMOS) de certains paramètres de base, permettant notamment aux enseignants formés dans un canton d'enseigner dans un autre canton romand avec un titre reconnu. Dans ce contexte politique, les efforts actuels d'harmonisation des cursus scolaires est un processus complexe qui n'est pas comparable à l'imposition de standards nationaux aux écoles et enseignants d'autres pays. La convention citée a permis d'établir un curriculum commun (quant aux objectifs) pour la Suisse romande au niveau de l'enseignement primaire et secondaire (I), mais pas encore au niveau qui concerne plus particulièrement cette recherche, le secondaire II (lycée). Au niveau du baccalauréat de type "académique", les responsabilités sont partagées entre les cantons et la Confédération. Cela rend possible des réformes locales des cursus et notamment une reconfiguration des branches d'études et de leurs poids respectifs dans la formation au baccalauréat comme c'est le cas dans l'établissement scolaire concerné par cette recherche. À peine quelques quelques années avant notre recherche, les enseignants de science ont assisté à une baisse des heures d'enseignement de leur discipline au sein de l'établissement.

À ce contexte politique s'ajoute une particularité culturelle en faveur de l'autonomie locale et de la responsabilisation des professionnels : les enseignants disposent d'une certaine liberté quant aux contenus enseignés et à la manière de le faire, particulièrement importante au niveau gymnasial. Cette situation a souvent un coût pour les enseignants : ils créent presque toujours leurs séquences pédagogiques eux-mêmes, et ne disposent que rarement de ressources plus ou moins prêtes à l'emploi pour enseigner. De nombreux enseignants se retrouvent surchargés lors de leurs premières années de pratiques professionnelles pour réussir à préparer leurs cours à temps. Les enseignants disposent d'une large offre de formation continue, dont le contenu est très varié, allant des activités de relaxation à des cours dispensés par des chercheurs universitaires, quoique moins nombreux. Ces formations n'offrent cependant aucun certificat ou diplôme, et ne jouent en général aucun rôle dans la promotion professionnelle des enseignants.

294. Le taux de maturité gymnasiale du pays est passé de 18% à 20% de 2000 à 2010. Cela reste relativement faible à l'échelle internationale pour un pays développé (cf. les chiffres de l'OCDE). Durant cette même période, la durée de la maturité gymnasiale a été ramenée dans la plupart des cantons à 3 ans, au lieu de 4 ou même 5 ans dans certains cantons dans les années nonante, avec une entrée au gymnase vers 15-16 ans et une sortie à 18-19 ans.

295. La formation initiale des enseignants étant spécifique à chaque Canton en Suisse (au moins jusqu'en 2010), les diplômes ne donnaient accès à l'enseignement que dans le Canton délivrant le diplôme.

D'importantes réformes de la formation initiale ont eu lieu ces vingt dernières années. Pour enseigner au niveau du secondaire II en Suisse romande, il est désormais nécessaire de disposer d'un titre universitaire dans les disciplines enseignées et d'une formation pédagogique dispensée actuellement par les Hautes Ecoles Pédagogiques. Cette formation pédagogique est une formation professionnelle duale : elle inclut un stage accompagné par un *formateur en établissement*[296] sur la majeure partie de l'année scolaire, qui est évalué et dont le succès conditionne l'accès au titre d'enseignant. Lors de ces stages, l'enseignant en formation, ou *enseignant stagiaire*, est assez vite amené à prendre la classe en main sous la supervision de son formateur. Le stage sert également souvent de terrain pour une recherche empirique en sciences de l'éducation, dénommée "mémoire professionnel" au moment où a lieu notre étude, et imposée aux étudiants comme travail de fin par les Hautes Écoles Pédagogiques. Cette pratique de recherche par les enseignants stagiaire est supervisée par un formateur de la Haute École, bien qu'elle implique également, au moins comme observateur, le formateur du stage. Cette pratique de recherche par les enseignants en formation initiale est relativement nouvelle au moment de la recherche : elle a été introduite quelques années auparavant.

Ce contexte institutionnel est important pour cette recherche, car l'enseignant ayant accepté de collaborer effectue justement sa dernière année de formation initiale et produit son mémoire professionnel dans le cadre de cette recherche.

4.4.1.2 Description du contexte institutionnel

L'établissement scolaire ("gymnase") comprend au moment de la recherche quelque 450 élèves pour les 3 années d'études, répartis en 28 classes. La formation consiste pour 80% en 7 disciplines fondamentales (français, allemand, troisième langue, mathématiques, sciences expérimentales, sciences humaines, arts visuels ou musique), pour 10% en une option spécifique (grec, italien, anglais, espagnol, russe, arts visuels, musique, physique et applications des mathématiques, biologie et chimie, économie et droit, philosophie/pédagogie/psychologie) et pour 5% en une option complémentaire (arts visuels, musique, sport, physique, applications des mathématiques, biologie, chimie, économie et droit, philosophie, enseignement religieux, pédagogie/psychologie, géographie, histoire, histoire en anglais). Le reste de la formation se partage entre le travail de mémoire et les activités sportives. En plus du choix de la troisième langue parmi l'anglais, l'italien et le latin, et du choix entre les arts visuels et la musique, les élèves choisissent leur option spécifique et leur option complémentaire, avec quelques contraintes minimales, notamment l'impossibilité de choisir une même discipline à la fois comme option spécifique et complémentaire. Environ 20% des élèves portent leur choix sur "physique et application des mathématiques" pour leur option spécifique, ce qui leur permettent d'approfondir ces disciplines.

La classe participant à la recherche regroupe des élèves ayant comme options spécifiques soit l'anglais, soit l'option philosophie/pédagogie/psychologie. Il ne s'agit donc pas des élèves qui ont choisi d'approfondir la physique. Les élèves disposent d'une heure hebdomadaire de cours de physique, et de deux heures

296. La dénomination des accompagnants et évaluateur de la partie pratique de la formation varient selon les régions, encore aujourd'hui.

bi-mensuelles de Travaux Pratiques en demi-classe, agendée en alternance avec des Travaux Pratiques de biologie et chimie. L'enseignement durant les cours comprend habituellement par un mélange d'enseignement frontal dispensé par l'enseignant, parfois sous forme dialoguée, et des "exercices d'application" que les élèves exécutent individuellement, c'est-à-dire des exercices nécessitant l'utilisation de formules algébriques pour répondre à la consigne, qui comprend parfois de résolution de problème avec des schémas géométriques et vectoriels. Les Travaux Pratiques permettent à l'enseignant de travailler les mêmes thématiques en parallèle au cours, et sont habituellement dédié à des travaux en petits groupes d'élève dans une orientation pédagogique de type *apprentissage coopératif*, centrés sur des activités expérimentales ou d'autres activités bénéficiant de la plus grande disponibilité de l'enseignant dans la configuration en demi-classe.

Les élèves, et l'enseignant, utilisent un ouvrage de référence en plus des feuilles distribuées par l'enseignant, intitulé *Formulaires & tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985), et comprenant presque toutes les formules nécessaires pour effectuer les exercices demandés, et bien davantage. Il s'agit d'un condensé des formules, lois, tables et mesures en mathématique, physique et chimie, écrit et édité par des commissions représentant les enseignants de mathématiques, physique et chimie. Les élèves doivent uniquement acquérir le *Formulaires & tables* pour leurs études. Les enseignants utilisent évidemment d'autres ouvrages de référence pour la préparation des leçons, qui seront présentés et commentés en fonction des usages rencontrés.

Naturellement, il est impossible de décrire une leçon typique de manière à généraliser la pratique scolaire d'une institution. Néanmoins, l'observation menée par le chercheur lors d'une leçon de TP pour laquelle il a été invité a permis une sommaire description des pratiques courantes du lieu, la leçon en question étant présentée par les enseignants comme représentative de ce qui se fait le plus souvent dans l'institution. Cette description est disponible à l'annexe D, section D.2, p. 949, et permet de se familiariser avec la micro-culture du lieu. Ceci est particulièrement important dans le contexte éducatif suisse, et tout particulièrement au niveau du gymnase, car les enseignants jouissent d'une grande liberté tant dans leur choix pédagogiques que pour ce qui a trait aux objectifs et contenus d'apprentissage. Par conséquent, les enseignants suisses sont depuis des décennies déjà des enseignants-concepteurs de dispositifs, et la manière de procéder est fortement marquée par les traditions des lieux, et par les personnes qui y travaillent.

En résumé, une leçon ordinaire de Travaux Pratiques de physique dans cet établissement scolaire se compose de trois phases distinctes :

1. Une phase de présentation de la thématique, du problème étudié, qui permet également de transmettre la consigne de la leçon aux élèves, parfois sous la forme d'un "protocole d'expérience".

2. Une phase d'expérimentation, souvent effectuée en petits groupes, où les élèves doivent généralement prendre des mesures et des notes sur leurs activités.

3. La rédaction d'un "rapport expérimental", qui devrait idéalement présenter les mesures, d'éventuels graphes, la réponse à la question posée et des arguments en faveur de cette réponse basés sur les observations ou mesures effectuées.

4.4.1.3 Appropriation du dispositif d'enseignement mi-fini par un enseignant

Mise en place d'une collaboration

La première présentation du projet de recherche ESCALATE aux enseignants de physique de l'établissement scolaire s'est organisé à la suite de contacts personnels entre un enseignant et le chercheur. Lors de cette rencontre, le chercheur invite les enseignants à reprendre le dispositif d'enseignement mi-fini, encore en construction à ce moment-là, voir à établir un partenariat institutionnel. Les enseignants s'expriment lors de cette rencontre sur les changements récents au niveau de la structure de la maturité du canton, instituant les "options spécifiques" et "options complémentaires" et réduisant le nombre de leçons de physique, soulignant que ces changements a changé leur manière d'aborder l'enseignement de la physique. Les enseignants planifient désormais leur enseignement de la physique "sous l'angle culturel" [297] plutôt que dans un objectif de maîtrise des savoirs enseignés. Autrement dit, les exigences ont été revues à la baisse et les objectifs recentrés sur la *méthode expérimentale* et la *réflexion scientifique*, au détriment de l'acquisition de savoirs spécifiques. Toujours selon les enseignants, seule l'enseignement aux élèves en "option complémentaire" reprend quelques ambitions en terme de connaissances en physique. Pour citer un exemple du domaine de la mécanique, le concept d'*inertie* n'est plus systématiquement travaillé avec les élèves comme auparavant.

En cohérence avec une réorientation de l'enseignement vers des enjeux "culturels", un cours interdisciplinaire a été créé en collaboration avec la philosophie pour aborder les sciences dans l'orientation d'une histoire des idées. Lors de ce séminaire en co-enseignement entre philosophes et scientifiques, les enseignants visent un dialogue interdisciplinaire sur des sujets historiques ou modernes de philosophie des sciences. Si les élèves se disent convaincus par cette forme de travail, ils restent du point de vue des enseignants trop peu engagés dans la discussion elle-même, se cantonnant souvent à un rôle d'auditeur. Malheureusement, la présente recherche n'a pas pu inclure l'observation de ce séminaire innovant, par manque de moyen.

Cette brève description du contexte institutionnel met en évidence que les enseignants sont soucieux d'améliorer la manière d'aborder l'enseignement de la physique, et participent activement dans ce but au moment où je présente mon dispositif d'enseignement mi-fini. Ils ont également des préoccupations et font le constat de difficultés qui perdurent depuis longtemps dans la pratique de l'enseignement de la physique au secondaire II, que je reprends dans l'*analyse préalable* ci-dessous. Lors de cette rencontre, les enseignants échangent leurs connaissances d'outils numériques déjà connus [298]. Pourtant, les enseignants

297. Propos des enseignants recueillis à l'oral lors des rencontres citées.
298. En particulier, les enseignants ont testé le logiciel *Crocodile Physics*, qui présente de leur point de vue l'inconvénient de coûter cher, le logiciel *Stella* qu'ils considèrent comme un apport intéressant, en particulier pour soutenir les élèves quant

déclinent l'offre de collaboration au projet de recherche en raison d'un manque de disponibilité, et malgré leur intérêt pour ses orientations pédagogiques. En contrepartie, ils invitent le chercheur à visiter certains cours, ce que celui-ci s'empresse de faire après avoir obtenu l'autorisation de la direction de l'établissement scolaire.

Après quelques visites des activités habituelles des enseignants, j'obtiens l'autorisation d'enquêter aux essais pilotes décrit plus haut, en sortant les élèves des séances de Travaux Pratiques lors des dernières semaines de l'année scolaire, qui sont traditionnellement dédiées à des activités plus récréatives. Ensuite, l'arrivée à l'orée de la nouvelle année scolaire d'un enseignant-stagiaire permet d'envisager une collaboration : l'enseignant-stagiaire doit justement effectuer une recherche pour son *mémoire professionnel* de fin de formation, dans l'année qui commence. Autre événement chanceux pour la recherche, le formateur en établissement de l'enseignant-stagiaire est l'enseignant le plus intéressé, dont j'ai principalement visité les cours. Dans ce contexte favorable, l'enseignant-stagiaire accepte de collaborer à l'élaboration d'une séquence d'enseignement et de reprendre le dispositif d'enseignement mi-fini. Si l'investissement consenti pour la conception d'une séquence innovante et pour la prise en main des outils numériques lui semble aussi poser le problème de disponibilité relevé par ses collègues, il fait le pari de bénéficier en retour des apports de la participation au projet de recherche pour son *mémoire professionnel*, et compte sur la reprise du dispositif d'enseignement mi-fini amené par le chercheur pour s'économiser une partie du travail de préparation des cours et de la réflexion pédagogique, élaborée en amont dans le projet ESCALATE.

Au vu de la manière dont la collaboration entre le chercheur et l'enseignant s'est construite, elle a profité d'un cadre très peu contraignant et de l'engagement volontaire des deux parties. Le travail de conception de la séquence devient dans ce contexte favorable l'objet de discussions orientées essentiellement sur les objectifs pédagogiques des partenaires, dans des échanges entre l'enseignant et le chercheur qui ont permis de nombreux ajustements de détail au fil des semaines dans l'exercice d'un regard réciproque sur les activités planifiées pour les élèves. En outre, les compétences en informatique des partenaires ont permis à l'enseignant de s'approprier les outils issus d'ESCALATE, et le formateur en établissement aide à intégrer *Digalo* au réseau informatique local, exercice particulièrement difficile et pour lequel il a fallu faire sans l'aide technique de l'établissement. Si la conception se fait sous une forme coopérative pendant quelques semaines, les rôles sont plutôt distribués par la suite, dès le début de l'enseignement de la séquence : l'enseignant mène la classe seul, alors que le chercheur procède à l'enregistrement des traces audio et vidéo, à l'exceptions d'une aide technique ponctuelle lorsque la classe et/ou l'enseignant rencontrent des difficulté avec *Digalo*. Le formateur en établissement n'intervient pas non plus dans l'enseignement, mais participe à l'une des séances en tant qu'observateur, par intérêt personnel, lorsque le logiciel *Digalo* est utilisé.

aux mathématiques présentes dans un modèle de physique, p.ex. en les aidant à induire des équations à partir de données ou mesure, et finalement le logiciel *Interactive Physics* qui leur paraît constituer le meilleur outils de simulation paramétrable.

Éléments repris du dispositif d'enseignement mi-fini

La tâche du toboggan à billes est utilisée par l'enseignant en amorce en tout début de séquence, avec le dispositif concret utilisé lors des essais pilote, en présentant le choc de la bille contre une rangée dont seule la dernière est projeté sur le plan horizontal. La tâche est présentée aux élèves avec le matériel concret en leur demandant de prédire le mouvement des billes. Dans un premier temps, une seule bille est placée sur la surface plane, l'autre est posée sur la pente, puis lâchée lorsque la prédiction a été formulée. Ensuite, les élèves sont invités à ajouter une seconde bille sur la surface plane, et on réitère la question, s'intéressant au sort des trois billes. Les élèves reçoivent des feuilles avec des schémas assez similaires à ceux des essais pilote, où ils écrivent leurs prédictions quant au mouvement des billes. Cette amorce est uniquement utilisée pour intriguer les élèves et susciter leur intérêt pour la séquence qui les occupera tout un semestre : l'enseignant ne fournit lui-même aucune explication ni prédiction du comportement des billes.

L'enseignant décide donc de reprendre l'usage du logiciel *Marbles Move* et la série d'exercices prévues par le dispositif d'enseignement mi-fini sans les modifier, et d'en faire une phase de sa séquence plus générale. Dans la planification de sa séquence, l'enseignant choisit également d'utiliser *Digalo* pour susciter la motivation nécessaire à un engagement des élèves dans des discussions, si possible argumentatives, et en fait également une phase de la séquence. Cette reprise et mise en séquence de *Digalo* donne pour fonction à l'outil de permettre un débat général dans toute la demi-classe (12 élèves), alors que le débat au sein des groupes de travail (2-4 élèves) se fait par conversation orale, comme d'habitude dans cet établissement scolaire. *Digalo* est néanmoins amené à jouer un rôle motivationnel lors de ces échanges intra-groupes : le fait de devoir poster un avis *de groupe* permet d'exiger aux élèves de se mettre d'accord sur la réponse à donner à l'exercice avant de contribuer sur le logiciel *en tant que groupe*. Ainsi, l'utilisation de *Digalo* prévoyait de susciter des discussions - éventuellement argumentatives - à deux niveaux : à l'oral dans des échanges intra-groupes, puis dans un deuxième temps à l'écrit sur le logiciel *Digalo* dans des échanges inter-goupe au sein d'une demi-classe. La potentielle motivation à argumenter que peut amener cet usage des outils numériques a été particulièrement bien reçue par l'enseignant, en raison notamment des difficultés connues des enseignants de l'établissement scolaire à obtenir une argumentation explicite de la part des élèves mentionnées dans l'analyse préalable.

Éléments ajoutés par l'enseignant ou en collaboration

En sus de éléments repris du dispositif mi-fini, l'enseignant construit deux questionnaires faisant office de pré-test et de post-test des conceptions des élèves dans son *mémoire professionnel*, qu'il distribue à tous les élèves de la classe participant à la présente recherche ainsi qu'à d'autres classes : une classe parallèle de même degré et du même établissement scolaire qui ne dispose pas de séances de Travaux Pratiques, et à quatre classes d'une autre institution (école professionnelle) où l'enseignement de la physique est également moindre en quantité. Chacun de ces deux questionnaires présente six items inspirés de situations-problèmes de la littérature des sciences de l'éducation, et un appariement entre les six items du pré-test et ceux du post-test a été fait de manière à évaluer des savoirs similaires mais à travers des tâches différentes entre

le pré- et le post-test. Sans entrer ici dans la discussion méthodologique qui permettrait de considérer ces questionnaires des *pré-test* et *post-test*, je signale simplement leur présence et le fait que je m'y réfère, dans la suite, sous les termes *pré-questionnaire* et *post-questionnaire*, au sens où le premier a lieu avant la séquence étudiée, et le second au terme de celle-ci. La construction pédagogique et les objectifs spécifiques de ces questionnaires sont présentés ci-dessous, dans l' *analyse a priori*.

La justification de ce questionnaire en tant que pré-test et post-test, si elle est pertinente pour un mémoire professionnel, nécessiterait une discussion détaillée quant à sa validité scientifique. C'est pourquoi nous n'utiliserons pas ces questionnaires dans ce sens-là, et nous y référerons en tant que questionnaires pré-séquence et post-séquence. S'ils ne répondent pas aux critères d'une expérimentation classique, qui est difficile à mettre en œuvre et n'était pas l'objet de l'implémentation de la recherche ESCALATE puisque nous souhaitions nous adapter au lieu d'enseignement et collaborer avec les enseignants qui y travaillent, ces questionnaires s'inscrivent cependant bien dans la réflexion d'ESCALATE en tant qu'opérationnalisation d'exercices révélateur de la profondeur des apprentissages.

Le pré-questionnaire séquence a également servi de base pour la conception, conçue conjointement par l'enseignant stagiaire et le chercheur, de l'activité des élèves à l'aide du logiciel *Digalo* : les élèves sont amenés à répondre, en discutant d'abord en groupe, puis entre groupes, aux 6 items de ce pré-questionnaire sur le logiciel. Enfin, pour terminer la séquence, les items du pré-questionnaire sont réutilisés pour une leçon de Travaux Pratiques où les élèves peuvent mener des expérimentations avec du matériel concret sur ces questions, en vue de l'écriture d'un rapport argumenté par groupe, selon le mode d'enseignement habituel des Travaux Pratiques de l'établissement.

4.4.2 Analyse préalable des enseignants

Les enseignants de physique de l'établissement scolaire contactés pour la recherche ont tous participé à l'analyse préalable, lors de la séance de rencontre avec l'ensemble de l'équipe, puis lors de discussion en salle des maîtres en marge des présences du chercheur lors de sa collaboration avec l'enseignant ayant accepté de concevoir une séquence. Ceci s'explique assez simplement : si le seul enseignant prêt à concevoir une séquence nouvelle et reprendre le dispositif d'enseignement mi-fini à sa manière est un enseignant-stagiaire, notamment pour des questions de disponibilité, ce sont plutôt les enseignants en fonction depuis plusieurs années qui connaissent bien les forces et les limites des modes d'enseignement habituels de l'établissement : ils ont donc tout naturellement fourni des réflexions très utiles en amont de la conception d'une séquence planifiée pertinente tant pour la recherche que pour la pratique et l'apprentissage des élèves.

Voici les principales difficultés récurrentes que les enseignants relèvent dans leurs pratiques :

— les connaissances des élèves en mathématiques ne leur permettent pas toujours d'aborder les savoirs à enseigner en physique, limitant le contenu au choix des enseignants, tout particulièrement la première année de gymnase ;

— les élèves se plaignent de ne rien apprendre, en particulier lorsque les enseignants se retrouvent - pour la raison évoquée ci-dessus - en situation de traiter des sujets simples qui n'ont pas le charme de la découverte ;

— les enseignants peinent à rendre la discipline attractive aux élèves, tout particulièrement en première année ;

— l'hétérogénéité des élèves fait que la formalisation mathématique est assez rapidement abordée par les enseignants, pour ne pas ennuyer les élèves les plus rapides, quand bien même cela ne permet pas de garantir qu'ils aient tous atteint les objectifs ;

— cette dernière difficulté s'est renforcée, semble-t-il, avec l'introduction du nouveau système cantonal où des élèves aux compétences moindres en mathématiques sont présents au sein de classes où d'autres ont de meilleures compétences ;

— plus spécifiquement aux Travaux Pratiques, l'argumentation demandée lors des "rapports expérimentaux" n'est presque jamais à la hauteur des attentes des enseignants, malgré la répétition explicite de la consigne sur l'utilisation attendue des mesures expérimentales dans la justification d'une réponse à la question posée.

Une des difficultés récurrentes mentionnées par les enseignants concerne justement l'argumentation des élèves : les enseignants reconnaissent ne pas savoir comment s'y prendre pour "faire argumenter" les élèves. Les rapports expérimentaux sont souvent lacunaires, ou excessivement brefs, quant à l'argumentation attendue, ou alors les réflexions qui s'y trouvent ne sont pas réellement argumentatives et reproduisent plutôt, comme par imitation, les exigences scolaires d'une tâche sans réflexion personnelle. Sur ce point en particulier, et sur la gestion de l'hétérogénéité, les objectifs du projet de recherche ESCALATE suscitent un intérêt certain de la part des enseignants, malgré leur manque de temps pour s'y engager plus activement.

À cette analyse des difficultés habituelles de l'enseignement de la physique dans cet établissement, s'ajoute une réflexion plus générale de l'enseignant stagiaire à partir de la littérature sur les préconceptions, et en particulier de la vision présentée par l'ouvrage de Courtillot et Ruffenach (2006) que lui ont remis les enseignants expérimentés du même établissement. Cet ouvrage présente plusieurs modèles d'apprentissage, sous une forme destinée aux enseignants, mais semble néanmoins encourager les enseignants à adopter dans l'enseignement de la physique une approche dénommée "enseignement constructiviste". Cette approche amène l'ouvrage à induire une hypothèse quant aux difficultés rencontrées par les élèves en physique, qui consiste à les attribuer essentiellement à des conceptions antérieures aux activités scolaires. Dans ce but, l'ouvrage recommande aux enseignants de faire émerger ces conceptions, pour mieux les "corriger", car elles constituent des "obstacles à l'apprentissage", en proposant "une technique pour détecter et fissurer ces obstacles : l'enseignement par situations-problèmes" (Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 208). Dans cette structuration du travail de l'enseignant, celui-ci est censé fournir les conditions aux élèves de se rendre compte, en quelque sorte *par eux-mêmes*, de leurs fausses intuitions, de manière à progresser au fil des

conflits cognitifs[299]. Je reviendrai en détail sur l'approche pédagogique proposée dans cet ouvrage lors d'une discussion de l'une des situations de malentendu (section 6.3.6.2, p. 452).

4.4.3 Analyse *a priori* de l'enseignant

À l'instar de l'analyse *a priori* du chercheur pour l'ingénierie du dispositif d'enseignement mi-fini, je ne présenterai pas ici une analyse *a priori* de chacune des tâches scolaires déléguées aux élèves au cours de la séquence planifiée par l'enseignant, car elles sont trop nombreuses dans une séquence prévue pour un semestre entier. Je présenterai ces analyses uniquement lorsqu'elles sont nécessaires à la présentation des situations de malentendu, directement au chapitre 6.

Du point de vue de l'enseignant, la tâche du toboggan à billes s'insère dans le chapitre de la physique enseignée au niveau gymnasial (lycée) en Suisse cette année-là. Ce chapitre comprend notamment, selon le curriculum national décrivant les aptitudes exigées pour l'examen de baccalauréat (cf. Annexe B, figures B.27 et B.28, pp. 827-828), la cinématique et la dynamique. Parmi ces deux sujets, la tâche du toboggan à billes permet, de son point de vue, de répond plus particulièrement aux objectifs suivants :

— appliquer les équations des mouvements rectilignes uniformes et uniformément accélérés, en particulier la chute libre des corps ;

— définir la notion de force ;

— appliquer les lois de Newton à des tâches de la vie courante ;

— représenter et calculer des forces de pesanteur, de frottements, de propulsion.

L'objectif pédagogique principal du dispositif d'enseignement mi-fini consiste à aborder ces compétences en physique par le biais d'activités de discussion et d'argumentation, notamment basée sur l'expérimentation

299. Si la référence à Piaget pour ce processus de *conflit cognitif* est fidèle, puisqu'il s'agit bien dans l'ouvrage de viser un *processus psychologique* qui a lieu au cours de l'apprentissage de l'élève, la dénomination "enseignement constructiviste" relève, de mon point de vue, d'une grave confusion épistémologique profonde entre l'usage de Piaget du terme "constructiviste" pour qualifier sa théorie - et non une approche pédagogique - qu'il a construite à partir de l'étude de l'apprentissage spontané d'enfants - et non de l'enseignement en milieu scolaire - de manière à investiguer les possibilités de connaître le monde de l'espèce humaine (une épistémologie empirique), ce qui est résolument autre chose que de faire l'étude de l'apprentissage d'un sujet psychologique (pour la distinction entre sujet épistémique et sujet psychologique, voir p.ex. : Atkinson, 1983, 2006, p. 65) singulier situé dans un milieu institutionnel particulier et travaillant sur une tâche spécifique (voir à ce sujet p.ex. Grize, 1982 ; Inhelder et al., 1992). Ainsi, le passage du terme "*constructiviste*" de qualifiant en *épistémologie* d'une théorie (ou *description* systématique) de la possibilité de connaître du *sujet épistémique* humain à un qualifiant *pédagogique* d'une *manière d'agir* d'un *sujet psychologique* enseignant transforme profondément la signification du terme "constructiviste". Le mélange sans discussion détaillée, dans cet ouvrage, de la théorie de Bachelard avec celle de Piaget y est certainement pour quelque chose : il n'est pas certains que ces deux auteurs disposent d'une épistémologie compatible. L'enseignant présente par contre le "constructivisme" de manière convaincante dans son *mémoire professionnel* : "Selon la pédagogie constructiviste ; les savoirs dans le domaine scientifique ne peuvent pas être simplement transmis, ils doivent être reconstruits. L'enseignant tente de transmettre des informations qui parfois pèsent peu face aux connaissances subjectives déjà présentes chez l'apprenant. En effet, ces dernières sont liées à l'expérience personnelle du sujet alors que les informations lui sont extérieures. Les élèves les recombinent alors de façon spécifique et construisent leur propre système explicatif du monde. L'enseignant peut éventuellement programmer son enseignement, mais il ne peut pas en aucun cas programmer les apprentissages de ses élèves. En effet, la décision, la possibilité d'apprendre appartiennent à celui qui apprend et personne ne peut le faire à sa place. L'enseignant s'efforcera donc de créer les conditions favorables afin que l'élève se construise lui-même.". Il ne semble donc pas dupé par la confusion signalée ci-dessus pour l'ouvrage lui-même, si ce n'est dans la confiance qu'il met à la démarche par situation-problème pour faire évoluer les "conceptions" des élèves qui se révélera, comme nous le verrons, partiellement déçue.

des élèves. À cet objectif pédagogique hérité du projet ESCALATE, l'enseignant ajoute un autre objectif principal à la séquence planifiée, issue notamment d'une référence de la littérature parmi les plus utilisées de l'établissement scolaire où il enseigne (Courtillot & Ruffenach, 2006), qui le motive à centrer son enseignement sur les conceptions des élèves. Il écrit dans son mémoire professionnel :

> *L'objectif de cette étude est de répondre à la question suivante : Une telle démarche peut-elle faire évoluer les conceptions et les représentations "erronées" chez les apprenants ?*
>
> *(Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 2)*

En cohérence avec l'approche pédagogique de l'ouvrage cité ci-dessus et présentée dans l'*analyse préalable*, l'enseignant planifie une activité d'évaluation diagnostique des conceptions des élèves à l'aide du pré-questionnaire de six items déjà mentionné (voir annexe B, figures B.15 à B.20, pp. 817-820), dont les questions s'inspire directement de "conceptions" listées dans l'ouvrage (Courtillot & Ruffenach, 2006, pp. 208-221) à partir desquelles l'enseignant construit des "situations-problèmes" (*ibidem*). L'enseignant fait l'hypothèse que la séquence planifiée devrait permettre, de manière plus marquée qu'avec d'autres approches pédagogiques, aux élèves de mettre en mouvement leurs conceptions et de les réviser en faveur des savoirs reconnus de la physique. Pour évaluer cette "correction" des conceptions des élèves, l'enseignant prépare un post-questionnaire (voir annexe B, figures B.21 à B.26, pp. 821-825) selon le même procédé, avec pour les six items du pré-questionnaire un nouvel item correspondant du point de vue de l'enseignant à la même "conception" chez les élèves. L'hypothèse quant aux changements de conceptions des élèves porte plus particulièrement sur les effets présumés de la séquence planifiée pour les leçons de Travaux Pratiques, décrite ici comme reprise et adaptation du dispositif d'enseignement mi-fini, et non les effets du cours théorique. Pour observer ces effets, l'enseignant compare dans la recherche de son *mémoire professionnel* les résultats de la classe participant à la séquence planifié (la différence de performance entre le pré-questionnaire et le post-questionnaire) avec les résultats d'une autre classe du même établissement scolaire qui ne dispose pas des séances de Travaux Pratiques.

L'approche pédagogique que l'enseignant trouve dans l'ouvrage cité, et la recherche qu'il planifie pour son *mémoire professionnel*[300] s'articule particulièrement bien, de son point de vue, avec le dispositif d'enseignement mi-fini proposé : en effet, la démarche pédagogique d'ESCALATE quant à l'*inquiry learning* coïncide avec les conseils pédagogique de l'approche pédagogique de l'ouvrage, centrée sur la mise en *conflit cognitif* des élèves face à des résultats issus de leurs expérimentations, et s'accorde par ailleurs aux pratiques habituelles de l'établissement scolaire, alors que la démarche pédagogique d'ESCALATE quant à l'argumentation trouve également un écho dans la proposition d'un "enseignement constructiviste" de l'ouvrage cité, qui conseille de susciter des "débats socio-cognitifs" (Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 210) pour "ébranler ces conceptions solidement ancrées" (*ibidem*) chez les élèves. La question de recherche du mémoire professionnel de l'enseignant illustre qu'il va néanmoins au-delà d'une assimilation du dispositif

300. Naturellement, l'enseignant s'appuie également sur d'autres références pour son mémoire professionnel, parmi lesquelles Bachelard (1938/1972) ; Giordan et de Vecchi (1990) ; néanmoins, le livre de Courtillot et Ruffenach (2006) fournit le point de départ de la réflexion et la majeure partie des "conceptions" utilisées pour la construction des questionnaires.

mi-fini à son projet, mais intègre une part de la réflexion d'ESCALATE - celle sur la modélisation à l'aide de Marbles Move - dans sa propre recherche :

Extraits du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p. 5

```
1 L'objectif primordial de ce mémoire est d'essayer de répondre à la question suivante:
2 la modélisation sur ordinateur et les travaux pratiques de type situation-problème
3 peuvent-ils changer les conceptions et les représentations "erronées" chez les
4 apprenants en sciences physiques, plus exactement en mécanique?
```

En conséquence de cette articulation toute trouvée entre le dispositif d'enseignement mi-fini et la recherche de l'enseignant, celui-ci place les activités argumentatives du dispositif mi-fini dans la séquence planifiée après le pré-questionnaire, et avant les activités d'expérimentation avec du matériel concret : il fait l'hypothèse qu'elles fonctionneront comme activités révélatrices et déstabilisatrices des conceptions des élèves. Des activités d'expérimentation, placées en fin de séquence juste avant la passation du post-questionnaire, l'enseignant fait l'hypothèse qu'elles permettront aux élèves de corriger leur "conception", en conflit cognitif avec la "réalité" [301] des phénomènes qu'ils observent.

Cette conception conduit l'enseignant à planifier la séquence suivante :

Phase n°1 : le recueil des conceptions à l'aide d'un questionnaire diagnostique (analysé par l'enseignant mais sans rétro-action aux élèves).

Phase n°2 : l'amorce à l'aide du toboggan à billes et la phase d'identification et de confrontation des conceptions des élèves entre eux, avec le logiciel *Digalo*.

Phase n°3 : la modélisation sur ordinateur avec le logiciel *Marbles Move*.

Phase n°4 : les travaux pratiques de type "situation-problème".

Phase n°5 : le questionnaire de fin de séquence, suivi d'une rapide présentation frontale de l'enseignant sur chacune des situations des deux questionnaires et guise de synthèse et clôture de la séquence.

En guise de synthèse, voici les hypothèses quant au fonctionnement de la séquence planifiée :

— le pré-questionnaire permet de faire émerger les conceptions des élèves (pour environ 70% d'entre eux) qu'il s'agira de corriger par des savoirs de physique ;

— les activités du dispositif d'enseignement mi-fini avec les outils numériques permettent aux élèves de prendre conscience de leurs conceptions et de se sentir déstabiliser par les conceptions différentes des leurs, certains peuvent éventuellement être convaincu lors de "débats socio-cognitifs" et, sinon, ils s'intéresseront tout particulièrement aux activités d'expérimentation de manière à trouver la réponse aux questions qu'ils se posent désormais ;

301. Terme repris et cité du modèle épistémologique de l'ouvrage (Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 210), que je ne prends pas personnellement en charge.

— les activités d'expérimentation avec du matériel concret leur permet de corriger les conceptions par des conflits cognitifs [302], auxquels les élèves sont désormais attentifs, et le fait de travailler en petits groupes renforce encore la remise en question nécessaire par des conflits socio-cognitifs ;

— les résultats au post-questionnaire sont significativement meilleurs qu'au pré-questionnaire ;

— les différence entre résultats au pré-questionnaire et résultats au post-questionnaire est significativement plus grande pour la classe qui a vécu la séquence planifiée que pour la classe parallèle qui n'a eu que le cours théorique de physique.

À ces objectifs généraux s'ajoutent des objectifs plus spécifiques à certaines parties de la séquence planifiée, où à l'usage des outils numériques. Par exemple, l'enseignant compte profiter de l'avantage que présente *Digalo* dans la production de traces écrites de l'argumentation des élèves, afin de pouvoir rapidement jauger de l'état des conceptions des élèves et offrir des rétro-actions adaptées à celles-ci.

La quatrième phase de la séquence planifiée, les travaux pratiques de type "situation-problème", fait l'objet d'une attention particulière de la part de l'enseignant :

Extraits du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire pp. 26-27

> Cette étape est délicate et tout à fait déterminante. Suivant la manière dont elle est gérée, elle peut engendrer un découragement ou, au contraire, une forte motivation qui donne une envie de relever le défi. Les élèves réalisent une réflexion personnelle qui va permettre l'appropriation de la situation et du problème, ainsi que la mise en place d'échanges avec émergence d'un questionnement, d'affirmations plus ou moins précises, de constats, de désaccords, de confrontation d'idées, d'arguments. Les élèves transforment leurs affirmations et le produit de leurs conceptions en hypothèses avec l'obligation de les écrire. L'obligation d'écrire le résultat de la réflexion force l'élève à affronter l'obstacle de la verbalisation et à concrétiser le fruit de son travail ce qui est très important. L'objectif didactique visé est la mise en défaut des conceptions "erronées" des élèves de façon probante. La démonstration doit être convaincante sinon la conception n'en sortira que renforcée!

302. L'enseignant écrit dans son *mémoire professionnel* "Cette étape est délicate et tout à fait déterminante car elle permet de tester par l'expérimentation les réponses au questionnaire donné au début de la séquence." (p. 13).

4.5 Ingénierie didactique III : la séquence d'enseignement effective

4.5.1 Description de la séquence effective

La description de la séquence effective suit l'organisation proposée par (Tiberghien, 1997, p. 360) pour présenter un *enseignement* :

1. Les savoirs à enseigner : pour éviter une trop longue présentation, cette partie ne présente les savoirs à enseigner que d'une manière assez générale.
2. La séquentialisation de l'enseignement : le déroulement effectif de la séquence est présenté en détail, et les écarts avec la séquence planifiée mis en évidence.
3. La mise en scène opérée : vu la longueur de la séquence, cette partie est également réduite à quelques spécificités importantes de la séquence effective, sans entrer dans le détail de chaque leçon.

Ces trois étapes de description font chacune l'objet d'une section, ci-dessous.

4.5.1.1 Organisation des savoirs à enseigner dans le cours de physique

Lorsque la séquence débute, les élèves ont déjà travaillé une année en physique, notamment sur la cinématique. Le cours de physique [303] est structuré selon par "chapitres", auxquels sont systématiquement associés des séries d'exercices. En voici la liste, dans l'ordre, des parties du cours concernant les savoirs qui touchent à la de près ou de loin à la mécanique [304] :

1. La cinématique.
2. Le mouvement circulaire uniforme MCU, la force de gravitation et les lois de Kepler.
3. Le travail et l'énergie.
4. Les lois de la dynamique.

La partie 1 (voir annexe B, p. 831) sur la cinématique a occupé une partie importante des cours de l'année précédente. Ce chapitre introduit aux élèves, dans l'ordre, les concepts de *vitesse*, *vitesse instantanée*, *mouvement relatif*, *accélération*, *mouvement rectiligne uniforme*, *mouvement rectiligne uniformément accéléré* et se termine par l'exposition de l'accélération d'un corps en chute libre dans le vide (voir annexe B, figure B.31), qui est un élément important pour comprendre la séquence étudiée et certaines des situations de malentendu présentées au chapitre. Ce cours sur l'accélération des objets en chute libre discute de faibles différences de valeurs de g selon que l'on se trouve à l'équateur ($g = 9.78 \frac{m}{s^2}$) ou au pôle nord ($g = 9.83 \frac{m}{s^2}$). Ce document ne présente que les résultats des calculs, sans fournir ni le détail mathématique permettant d'y parvenir, ni la loi de la gravitation universelle, par exemple. Plusieurs équations sont

303. La description du cours théorique se base uniquement sur les documents écrits distribués aux élèves, et les informations orales données au chercheur par l'enseignant. Aucune observation n'a été effectuée.
304. L'électricité ou d'autres sujets de ce type n'ont pas été inclus dans la liste, par soucis de simplification.

néanmoins fournies qui articulent la position d'un objet en chute libre avec sa vitesse de départ, sa vitesse instantanée (à une moment donné) et g.

La partie 2 [305] (voir annexe B, figure B.32) introduit le *mouvement circulaire uniforme* et l'*accélération radiale* pour présenter ensuite la *force de gravitation*, avec la loi de la gravitation universelle, celle-ci ayant été élaborée historiquement justement à l'occasion de l'étude des mouvements circulaires uniformes des planètes du système solaire. Le chapitre se termine avec la présentation des lois de Kepler, et l'application de ces concepts sur le concept d'*orbite*, avec la *vitesse orbitale* et la *période de l'orbite*. Dans ce chapitre, les tâches font tantôt référence à un milieu vide comme l'espace, tantôt à un milieu sous atmosphère comme la surface de la terre. L'introduction du concept de force est effectuée en ne présentant que la *force de gravitation* exercée par les astres. Le frottement et les autres forces éventuelles ne sont pas encore présentées.

Cette partie du cours comprend également une série d'exercices (voir annexe B, p. 841). Cette série d'exercices intitulée *Mouvement circulaire uniforme MCU, la force de gravitation, les lois de Kepler* traite essentiellement de la gravitation, le mouvement circulaire permettant de mieux comprendre comment cette loi s'applique au cas des astres. De manière similaire aux autres séries d'exercices, ces exercices exigent des élèves l'utilisation correcte des formules mathématiques déterminant les relations entre les notions pertinentes : distance, force de gravitation, masse et vitesse.

La partie 3 (voir annexe B, p. 841) traite du *travail* produit par une *force* constante, et introduit le concept d'*énergie*, dont l'*énergie cinétique*. La *puissance* mécanique et les notions de *rendement* et de *transformation d'énergie* sont également discutées. Cette partie du cours comprend également une série d'exercices (voir annexe B, p. 841). Cette série d'exercice s'intitule *Travail et énergie*, et comprend une première partie qui donne pour tâche aux élèves de calculer le *travail* dans différentes tâches, la *puissance* ou parfois la *force* à partir de ces mêmes quantités. Dans la deuxième partie, les exercices posent des questions relatives aux diverses formes d'énergie, leur comparaison et le rendement.

La partie 4 (voir annexe B, figures B.33, B.34 et B.35) aborde enfin la statique et la dynamique des forces, c'est-à-dire les savoirs de mécanique sur lesquels les Travaux Pratiques sont principalement orientés. Cette partie commence au début de la $2^{ème}$ année, c'est-à-dire quelques semaines avant et pendant la recherche. C'est la partie du cours sur la mécanique qui concerne plus particulièrement le concept de force et notamment qui introduit les trois lois de Newton. Le concept d'inertie et de masse y est abordé, et une définition algébrique du poids est donnée. C'est à ce moment-là que le support de cours présente explicitement qu'il faut une *force* pour produire une *variation de vitesse*, c'est-à-dire l'*accélération* d'un corps, une distinction entre les forces qui s'exercent au contact et celles qui s'exercent à distance, et une définition de la *masse* en tant que résistance aux variations de vitesse, celle du *poids* en tant que *force gravitationnelle* exercée sur un corps. Ce chapitre présente plusieurs illustrations, dont l'une représente l'attraction mutuelle entre la terre et un homme marchant à la surface de celle-ci. Cette

305. Les numéros des intitulés des chapitres des polycopiés, p.ex. "chapitre 1", ne correspondent pas forcément à l'ordre de leur utilisation.

partie du cours comprend également une série d'exercices (voir annexe B, section B.4.4, p. 854). Cette série d'exercice intitulée *les lois de la dynamique* comprend essentiellement des tâches de calcul utilisant les équations mathématiques réglant les rapports entre force, accélération, vitesse et masse. Le dixième et dernier exercice de cette série présente le dessin d'un chariot dont on connaît la masse sur une pente de 10°, et demande de dessiner toutes les forces qui agissent sur le chariot. La donnée de l'exercice précise que la force motrice et la force de frottement sont nulles. L'élève doit aussi donner l'intensité de chaque force, et l'accélération du chariot.

L'évaluation sommative effectuée par les élèves sur ces savoirs enseignés et pendant la recherche, est un questionnaire écrit qui porte le titre *cinématique et forces* (voir annexe B, section B.4.4, p. 854 et suivantes). Il comprend quatre exercices, dont l'un présente un chariot sur un plan incliné et un autre un char est tiré sur un plan horizontal. Ces exercices sont des tâches proches de celles de la série d'exercice du dispositif d'enseignement mi-fini effectuée avec le logiciel *Marbles Move*. Il est demandé aux élèves d'inventorier les forces qui agissent sur le chariot, de donner leur direction, leur sens et leur intensité, et de déterminer l'accélération du chariot et la distance parcourue après une minute. Les autres questions de l'évaluation sommative portent sur le concept de *travail*, et sur le *mouvement circulaire uniforme*, avec la situation du pendule, où les élèves doivent notamment trouver sa *période*).

4.5.1.2 Déroulement temporel de la séquence effective

Le tableau 4.2 ci-dessous présente les diverses phases de la séquence effective avec les activités des élèves lors des séances de Travaux Pratiques au cours du premier semestre de leur $2^{ème}$ année de lycée, qui comprend toute la séquence planifiée, et quelques leçons hors séquence. Comme la classe est divisée en deux groupes (A et B), la fréquence bi-mensuelle des leçons et les aléas de la vie scolaire (sorties, jours fériés, etc.) provoquent quelques différences dans la séquence effective des deux groupes. Ces différences, lorsqu'elles doivent être mentionnées, seront indiquées par la suite avec la référence à la demi-classe : "séquence A" ou "séquence B". Une présentation chronologique plus précise est disponible en annexe (voir annexe B, tableau C.1, p. 871).

Phases de la séquence	**Activités effectuées par les élèves** *Principales modalités de travail*	**Demi-classe A**	**Demi-classe B**
	Introduction à la mécanique *demi-classe plénière, enseignement frontal participatif*	15 août	29 août
1	**Passation du pré-questionnaire** *travail individuel, exercice papier-crayon*	5 septembre	12 septembre
	Activités expérimentales avec un pendule *travail de groupe, matériel concret, rédaction d'un rapport*	17 octobre	7 novembre
2	**Amorce sur le toboggan à billes (groupe A)** **Activités 1-2 avec le logiciel *Marbles Move*** *travail de groupe, un ordinateur par groupe*	31 octobre	28 novembre
2	**Activités 2-3-4 avec le logiciel *Marbles Move*** *travail de groupe, un ordinateur par groupe*	21 novembre	12 décembre

Phases de la séquence	**Activités effectuées par les élèves** *Principales modalités de travail*	**Demi-classe A**	**Demi-classe B**
2	**Activités 4-5 avec le logiciel *Marbles Move*** *travail de groupe, un ordinateur par groupe*	5 décembre	*en devoir*
3	**Activité de discussion sur le pré-questionnaire avec le logiciel *Digalo*** *travail de groupe, un ordinateur par groupe connecté en réseau synchrone aux autres groupes par un graphe d'argumentation*	16 janvier	23 janvier
4	**Activités d'expérimentation sur le pré-questionnaire** *travail de groupe, 6 postes d'activités avec matériel concret, rédaction d'un rapport*	30 janvier	6 février
5	**Synthèse effectuée par l'enseignant sur les deux questionnaires** Évaluation de la séquence par les élèves par oral *demi-classe plénière, enseignement frontal participatif*	13 février	27 février

TABLE 4.2 – Séquence effective des Travaux Pratiques et autres activités du 1^{er} semestre.

Juste avant de débuter la séquence planifiée a lieu une activité de Travaux Pratiques sur le pendule, décidée, planifiée et mise en œuvre par l'enseignant seul, notamment en raison de l'organisation des savoirs à enseigner exposée ci-dessus - il souhaitait dédier une activité au *mouvement circulaire uniforme* - et pour se donner le temps de commencer la séquence planifiée, qui n'était pas tout à fait prête à la rentrée scolaire.

La première différence entre la séquence planifiée et la séquence effective concerne le temps prévu pour la séquence : celle-ci se prolonge jusqu'au mois de janvier, alors que l'enseignant pensait terminer avant les vacances de Noël. Ce débordement s'explique en partie par l'annulation inattendu de leçons, par l'extension des activités avec le logiciel *Marbles Move* à une leçon supplémentaire - conformément aux objectifs du dispositif d'enseignement mi-fini de laisser libre la durée de ces activités - et au fait que la synthèse effectuée par l'enseignant sur les douze situations-problèmes des pré-questionnaire et post-questionnaire n'a pas pu se faire durant la même leçon que la phase 4 de la séquence, comme l'enseignant l'avait prévu. Une demi-heure y a été dédiée lors d'une leçon ultérieure.

Une deuxième différence importante est l'abandon, pour le groupe B, de l'amorce effectuée à l'aide du dispositif matériel du toboggan à billes et centrée sur la collision entre les billes. À la première demi-classe (A), l'enseignant présente le dispositif constitué d'un rail avec une pente d'inclinaison variable, et une surface horizontale où une bille est placée au repos. Il tient une bille en haut de la pente, qui entrerait en collision avec la bille au repos si elle était lâchée, et demande aux élèves de prédire ce qui va se passer après la collision : les billes seront-elles les deux en mouvement ? Auront-elles la même vitesse ? La question est répétée avec cette fois une rangée de deux billes placées côte-à-côte sur le plan horizontal. Une fois ces questions posées par l'enseignant devant tout le groupe d'élèves, ceux-ci reçoivent pour leur investigation le même matériel, composé d'un rail plastique ayant un coefficient de frottement très faible et des billes de deux lots de masses différentes mais de tailles identiques, le premier comprenant des billes de verre, l'autre

des billes de bois. L'enseignant n'a pas prévu de donner une réponse standard à ce problème, et laisse les élèves tenter de répondre par eux-mêmes.

Cette tâche de prédiction en amorce n'a pas été reprise dans la séquence avec la demi-classe B, pour plusieurs raisons. Premièrement, elle a considérablement attiré l'attention des élèves, de telle sorte qu'une bonne part d'entre eux sont restés mentalement orientés sur ce problème toute la leçon, ce qui a interféré avec les exercices prévus avec le logiciel *Marbles Move*. Deuxièmement, cette tâche a provoqué de nombreuses questions chez les élèves, dont certaines nécessitant une modélisation si complexe en physique, que l'enseignant ne pouvait y répondre directement et qu'il aurait fallu beaucoup de temps pour construire une réponse un tant soit peu satisfaisante.

Une autre différence entre la séquence planifiée et la séquence effective concerne le logiciel *Digalo* : il n'était pas prévu initialement de prendre du temps pour expliquer le fonctionnement du logiciel, les élèves de cette génération étant considérés comme suffisamment à l'aise avec les logiciels en général. Cependant, lors du premier usage de l'outil numérique avec le groupe A, des difficultés importantes sont apparues : de nombreux élèves n'arrivaient par exemple même pas à poster une contribution, et il a fallu leur expliquer qu'il fallait cliquer avec la souris dans l'espace vide de l'interface graphique. En raison de la perte de temps à ces ajustements lors de la leçon, une brève explication du logiciel a été effectuée pour le groupe B qui leur a permis de contribuer beaucoup plus rapidement aux discussions sur *Digalo*. En outre, l'enseignant pensait pouvoir gérer le débat directement sur le logiciel, mais cette tâche s'est révélée trop prenante pour la disponibilité dont il a effectivement bénéficié en présentiel. En effet, l'enseignant était sollicité par les groupes d'élèves pour diverses raisons, et s'il a pu passer du temps à observer la construction du graphe d'argumentation, ses interventions directement sur le graphe d'argumentation se sont limitées à intervenir dans les digressions ou les usages d'un niveau de langage inapproprié.

4.5.1.3 Mises en scène des leçons de Travaux Pratiques

Cette section est dédiée à la description du matériel physique, des consignes dispensées à l'oral et d'autres informations importantes pour se représenter le milieu didactique construit lors des leçons de Travaux Pratiques de la séquence effective. Les descriptions restent sommaires, vu le nombre d'activités différentes, et seront complétées si nécessaires à l'occasion de l'analyse des situations de malentendu, en fonction des besoins.

Caractéristiques générales à la séquence

Les leçons de Travaux Pratique ont lieu dans une salle de laboratoire, où les élèves sont disposés deux par tables. Les tables sont équipées de prises électriques, notamment, et sont suffisamment large pour accueillir un ordinateur portable en plus d'une feuille de papier. Lors de ces leçons, les élèves ont l'habitude de facilement circuler entre les tables, de former des groupes de trois ou 4 élèves autour d'une table en déplaçant les chaises, sauf lors des moments d'enseignement frontal dispensé par l'enseignant durant lesquels ils sont disposés en rang pour écouter.

Le rôle de l'enseignant lors de ces leçons consiste essentiellement à circuler entre les tables pour aider les élèves en cas de besoin, et répondre à leurs questions et sollicitations. Le chercheur s'est occupé de l'enregistrement audio et vidéo, et n'interagit pas avec les élèves, à l'exception de rares échanges lors de difficultés techniques avec les outils numériques pour lesquels l'enseignant sollicite son avis.

L'enseignant ne fait aucune rétro-action évaluative sur les réponses aux six "situations-problèmes" du pré-questionnaire au cours des phases 1-4 de la séquence, souhaitant maintenir le suspens jusqu'aux activités expérimentales effectuées par les élèves. Malgré les fréquentes sollicitations des élèves pour vérifier ou confirmer leurs observations et réflexions, l'enseignant s'en tient à cette posture, en cohérence avec l'approche pédagogique qu'il a choisie.

Caractéristiques spécifiques à des leçons particulières

Lors de la passation du pré-questionnaire, les élèves n'ont pas droit au Formulaires & tables (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985) comme à l'accoutumée, ni à leurs polycopiés de cours. L'enseignant rencontre une résistance de la part de plusieurs élèves, qui refusent de répondre parce que leur étude en cours ne leur ont pas fourni la procédure ou les connaissances nécessaires, les élèves se plaignant de ne pas savoir ou de n'avoir pas étudié ces questions. L'enseignant est alors amené à insister sur le fait qu'il souhaite juste observer leur opinion, voir ce qu'ils pensent, instituant ainsi un nouveau rapport à l'erreur dans le contrat didactique [306]. L'enseignant écrit à ce propos dans son *mémoire professionnel* : "Les élèves ont peur de "répondre faux ". J'ai ajouté que tout apprentissage implique le droit à l'erreur. J'ai bien pris conscience du problème du rapport à l'erreur qui était très présent." (p. 16).

Lors des leçons avec le logiciel *Marbles Move*, les élèves disposent également du dispositif concret avec les billes. Une photo (voir figure 4.7 ci-dessous) illustre les ressources à disposition des élèves à un moment de cette activité.

À la phase 3 de la séquence, l'enseignant commence par présenter les tâches du questionnaire pour rappel aux élèves, puis les élèves apprennent à utiliser le logiciel Digalo. Les élèves de la séquence A se lancent directement dans le logiciel, alors que ceux de la séquence B bénéficie d'une courte explication frontale de l'enseignant avec projection au beamer qui permet d'éviter les difficultés rencontrées par l'autre demi-classe. Les douze élèves sont répartis en quatre groupes de trois élèves (sauf pour les absents). Sans être autrement avertis, les élèves se retrouvent donc confrontés à ces questions de physique qualitative, que l'enseignant nomme "situations-problèmes", qui rompent avec les "exercices d'application" auxquels ils sont habitués. Ils ont en ressource leur polycopié de cours, leur Formulaires & tables, mais surtout les échanges du groupe. Les élèves n'ont pas repris ces questions depuis la passation du pré-questionnaire, et

306. Dans les habitudes scolaires de l'établissement, toute production écrite des élèves est généralement évaluée, même lors des Travaux Pratiques : les "rapports expérimentaux" sont notés et contribuent à la moyenne annuelle de physique des élèves, et lorsque ce n'est pas le cas l'enseignant le déclare explicitement aux élèves. L'évaluation diagnostique construite par l'enseignant sous forme de pré-questionnaire est ainsi tout à fait nouvelle pour les élèves, et contribue à modifier le contrat didactique assimilé par les élèves.

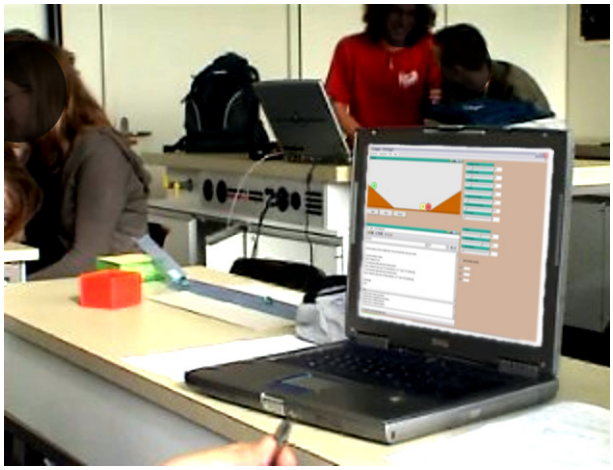


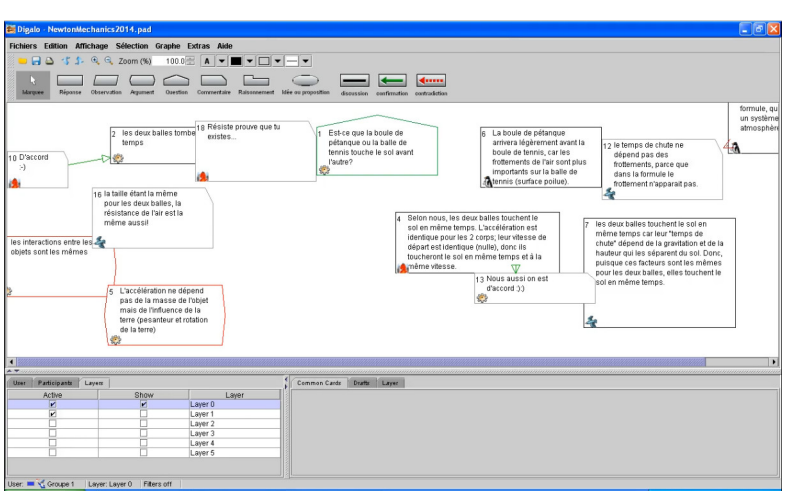
FIGURE 4.7 – Photo du dispositif concret et du logiciel *Marbles Move*, phase 2 de la séquence.

comme il y a des réponses individuelles divergentes dans chaque groupe, ils sont invités par l'enseignant à se mettre d'accord entre eux avant de donner un avis commun par l'intermédiaire de *Digalo*.

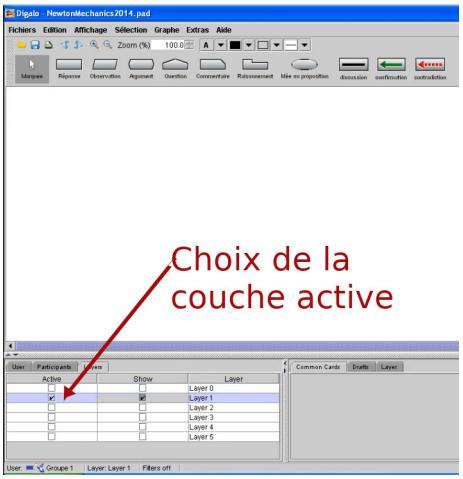
Lorsque chacun des quatre groupes est prêt, connecté avec un *avatar* différent sur le même graphe d'argumentation sur *Digalo*, ils commencent à discuter la première tâche du questionnaire, à écrire leur réponse sur l'ordinateur et ensuite à la publier sur le graphe d'argumentation. L'activité avec le logiciel *Digalo* est structurée par *couches* ("layer" dans le logiciel) : les élèves sont invités à donner leur réponse de groupe à chacune des six questions du pré-questionnaire, après en avoir discuté au sein du groupe, sur une couche dédiée à cette question. Une fois les interventions des groupes apparaissant à l'écran, un débat s'engage qui dure une dizaine de minutes. L'enseignant signale aux élèves de passer à la question suivante : les élèves peuvent alors activer la couche suivante (colonne "active", voir figure 4.8 ci-dessous) et faire disparaître (colonne "show", même figure) le graphe d'argumentation précédent de leur écran pour laisser la place à un nouvel espace sur lequel s'inscrit leurs prochaines contributions.

La leçon de deux périodes de quarante-cinq minutes suffit donc tout juste à traiter les six questions, et ne laisse guère de temps mort aux élèves. L'issue des débats est laissée ouverte, l'enseignant n'intervient pas pour trancher entre les divers points de vue et donner la réponse juste. L'enseignant écrit dans son mémoire professionnel : "J'étais seulement un guide et un observateur pendant cette séance pour ne pas influencer mes élèves. J'ai espéré que les élèves apprennent à formuler des questions, à proposer des solutions raisonnées qui ne sont pas apparues dans le questionnaire" (p. 25). Si les élèves le pressent de le faire, il leur explique que la prochaine séance sera consacrée à des expérimentations avec du matériel concret sur ces mêmes questions, et qu'ils pourront à cette occasion trancher le débat.

À la phase 4 de la séquence, l'enseignant met à disposition un poste expérimental pour chacune des six situations du pré-questionnaire, comprenant un matériel choisi de manière à permettre une expérimentation. Les élèves ne reçoivent pas de protocole d'expérience : c'est à eux de concevoir leurs expériences de manière à vérifier leur réponse de groupe aux situations-problèmes ou, le cas échéant, à trancher le débat au sein



(a) Graphe d'argumentation d'une première couche.



(b) Affichage et activation d'une deuxième couche.

FIGURE 4.8 – Captures d'écran d'une couche pleine et d'une couche vide dans la même session du logiciel *Digalo*, avec commentaire en rouge.

du groupe. Chaque groupe rédige un rapport de ses expériences (protocole, mesures et résultats) au fur et à mesure de ses activités expérimentales, et le remet complété pour les six postes à l'enseignant à la fin de la leçon.

Le tableau 4.3 ci-dessous présente le matériel mis à disposition pour chacune des situations-problèmes du pré-questionnaire.

N°	Consigne du pré-questionnaire	Matériel à disposition
1	• Situation 1: Balle de tennis Boule de pétanque Sol Voici une balle de tennis et une boule de pétanque (de forme identique), laquelle touchera le sol en premier si je les lâche de la même hauteur ?	- une balle de ping-pong - une balle "magique" (pleine) - une balance - un chronomètre
2	• Situation 2: Corps Plateau Pèse-personne (a) (b) (c) (d)	- une longue perche en fer - un pèse-personne
3	• Situation 3: Dans les trois situations qui se succèdent, représentez les forces qui s'exercent sur le ballon?	- une "medicine ball" (balle de sport de grande masse)

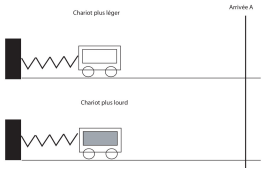
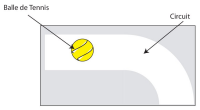
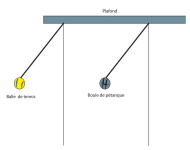
N°	Consigne du pré-questionnaire	Matériel à disposition
4	*Situation 4:*  	- deux petites voitures de masse différentes - un double lanceur de voiture à ressort - une balance - un chronomètre
5	• Situation 5:  Peut-on faire prendre le virage du circuit à la balle (sans qu'elle sorte de celui-ci)?	- une balle de tennis - un tracé sur la longue table de l'enseignant (pupitre)
6	• Situation 6:  On lâche, au même temps et au même condition, deux masses différentes (voir la figure) Lequel des deux masses fait un mouvement d'aller-retour en minimum de temps?	- des poids à suspendre de masses variées - un fil suspendu à une perche - un chronomètre

TABLE 4.3 – Matériel à disposition des élèves pour leurs activités expérimentales.

L'enseignant exige une trace écrite pour que les groupes puissent exposer leur travail, et pour permettre une meilleure mémorisation. Pendant les activités, il se fait discret et passe de groupe en groupe surtout dans le but d'assurer l'avancement du travail. Lors de la deuxième période, il a prévu une mise en commun durant laquelle chaque groupe d'élèves présenterait ses réponses en les justifiant brièvement. Cette mise en commun aurait peut-être encore suscité des débats, sur la manière de mener les expérimentations pour répondre aux différentes "situations-problèmes", c'est-à-dire en élargissant le champ de réflexion aux questions méthodologiques de la construction d'un protocole d'expérience, de la mesure et de l'interprétation des résultats. L'enseignant visait la construction de connaissances méta-cognitives à ce moment-là. Mais cette seconde partie de l'activité est reportée à la leçon suivante et s'est réduite à une synthèse frontale effectuée par l'enseignant, justifiée par le manque de temps à disposition.

Post-séquence

Après la passation des élèves au post-questionnaire, l'enseignant explique les fondements pédagogiques de la séquence, et revient sur chacune des douze questions des questionnaires et le problème des préconceptions dans l'enseignement de la physique en général. Cette leçon permet également à l'enseignant de susciter une évaluation par les élèves, effectuée de visu et oralement. Voici la synthèse du point de vue des élèves exprimé à cette occasion :

— les élèves ont globalement apprécié la séquence, en particulier la présence d'outils numériques, comme un changement bienvenu dans les habitudes ;

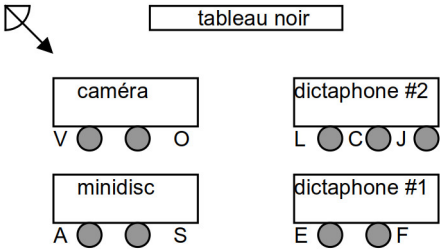
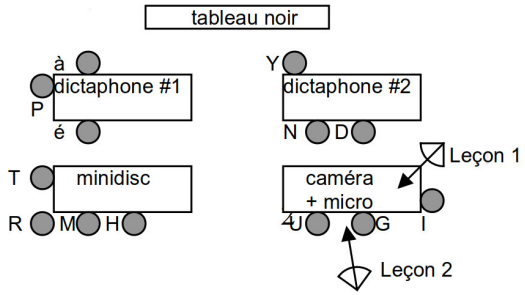
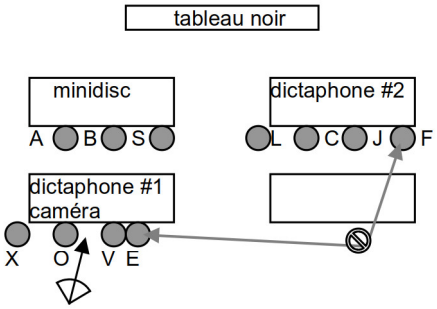
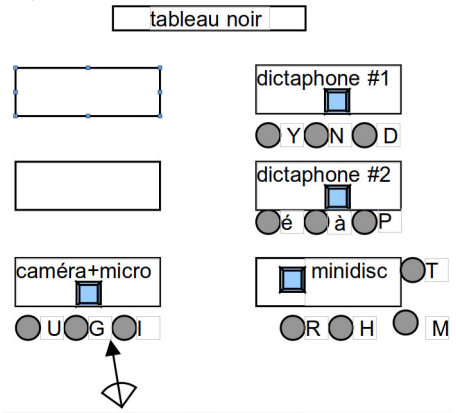
— ils relèvent néanmoins que le travail d'analyse s'est prolongé un peu longuement sur les mêmes situations (le toboggan à billes ou les "situations-problèmes" du pré-questionnaire) ;

— ils disent ne pas comprendre l'intérêt [307] de l'argumentation par écrit effectuée par l'intermédiaire de *Digalo*.

Lors de la dernière leçon de l'année, le chercheur a également présenté son projet de recherche aux élèves en présentant les premiers résultats.

Présence des élèves, disposition en classe et plans d'enregistrement

Le tableau 4.4 ci-dessous présente la disposition des élèves (indiqué par une lettre) en classe lors de chaque leçon, et les plans d'enregistrement des traces audio (dictaphone & minidisc) et vidéo (caméra).

Activité	Séquence A	Séquence B
Activités avec le logiciel *Marbles Move*	Leçon du 31 octobre 	Leçon du 28 novembre 
Activités avec le logiciel *Marbles Move*	Leçon du 21 novembre 	Leçon du 12 décembre 

307. Évidemment, que les élèves ne perçoivent pas consciemment l'utilité pédagogique du dispositif ne retire rien à son éventuelle efficacité. Concernant plus particulièrement l'intérêt du passage à l'écrit, les observations effectuées lors des essais pilotes et des analyses des situations de malentendu montrent combien ce passage est un processus important dans l'appropriation des connaissances, en particulier lorsqu'il s'agit pour les élèves de devenir *individuellement* capables de réussir une tâche ou de reproduire une réflexion effectuée avec succès *en groupe* ou *avec l'enseignant*, c'est-à-dire au moment de faire passer une tâche de leur *zone de développement proximal* à leur *zone de développement actuel* (Vygotski, 1934/1997).

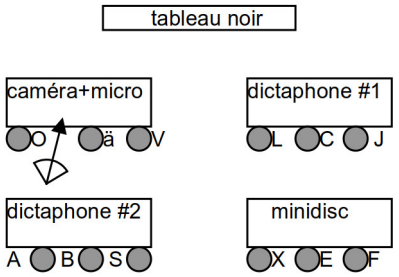
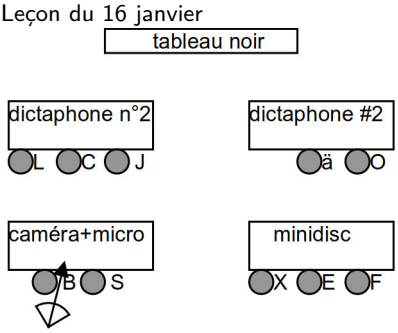
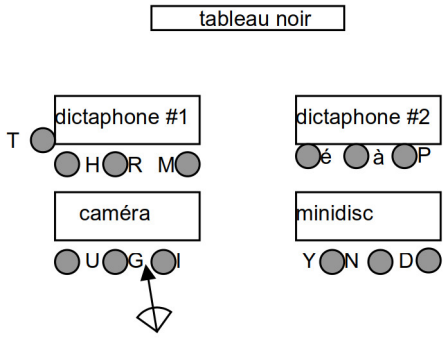
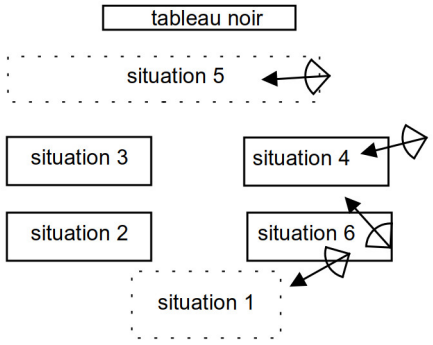
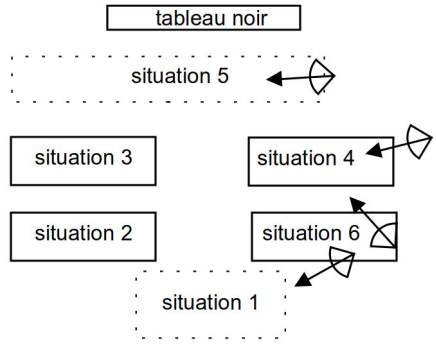
Activité	Séquence A	Séquence B
Activités avec le logiciel *Marbles Move*	Leçon du 5 décembre 	
Activités avec le logiciel *Digalo*	Leçon du 16 janvier 	Leçon du 23 janvier 
Activités d'expérimentation	Leçon du 30 janvier 	Leçon du 6 février 

TABLE 4.4 – Plan de disposition des élèves et des enregistrements audio et vidéo.

L'angle de prise de vue de la caméra est indiqué par le symbole ⬔. Ce tableau permet aussi de suivre les changements temporaire de groupe selon les leçons : lorsqu'un groupe comptait moins de trois élèves, les deux élèves restant ont été placés dans d'autres groupes pour qu'ils bénéficient de suffisamment d'interactions sociales. La suppression d'un groupe est indiquée sur les plans par le symbole ∅. Le tableau 4.5 ci-dessous donne la correspondance entre les lettres désignant les élèves et les prénoms fictifs qui leur ont été attribués pour permettre leur désignation au cours de la recherche.

	♂		♀
à	Alain	ä	Annette
d	Daniel	a	Aurélie
e	Ernest	b	Barbara
é	Etienne	c	Cassandra
f	Ferdinand	g	Germaine
t	Thibault	h	Henriette
u	Urs	i	Ilona
v	Victor	j	Julianne
x	Xavier	l	Laurie
y	Yves	m	Marie
		n	Nina
		o	Ophélie [308]
		p	Pierrette
		r	Rose
		s	Sylvie
N=	**10**		**15**

TABLE 4.5 – Liste des prénoms fictifs des élèves.

4.5.2 Analyses *a posteriori*

Globalement, la séquence mise en œuvre à travers la démarche de recherche collaborative par *dispositif d'enseignement mi-fini* apparaît comme une réussite pour les acteurs qui s'y sont engagés :

— pour les élèves, comme le montre leur engagement dans l'activité, leur prise en main et utilisation des outils numériques, la quantité et la qualité de leurs échanges et de leurs productions écrites montrent que la séquence a fonctionné au moins aussi bien qu'une séquence habituelle de l'établissement scolaire ; en outre, les élèves l'ont préférée pour le changement bienvenu qu'elle a amené à leurs pratiques scolaires en physique ;

— pour l'enseignant, qui a construit une séquence nouvelle qu'il a menée conformément à ses objectifs jusqu'au bout, avec des résultats intéressants et encourageants dans sa recherche de *mémoire professionnel,* et aussi pour sa formation [309] à l'enseignement, en particulier au fait d'acquérir une vigilance particulière aux représentations des élèves, à donner à leurs "erreurs" une place positive dans un processus d'apprentissage et pour avoir adopté et maintenu une posture conforme à son approche, sachant laisser l'enseignement frontal pour rester en retrait dans une observation et une gestion de classe donnant aux élèves la possibilité de s'engager activement ;

— pour le chercheur, car le dispositif d'enseignement mi-fini n'a pas seulement été repris de manière à pouvoir évaluer la pertinence des hypothèses d'ingénierie didactique établies dans le marcottage de

308. Cette élève a quitté l'école début 2007 en raison de performances jugées trop basses.

309. L'enseignant écrit dans son *mémoire professionnel* : "la mise en place de cette pédagogie (...) m'a permis de connaître le niveau réel de mes élèves avant de commencer une séquence. Ainsi, j'ai pu prendre conscience des obstacles à franchir et du chemin à parcourir entre les conceptions de mes élèves et les objectifs imposés par les programmes scolaires. Elle a permis aux élèves de prendre conscience de leurs erreurs. L'élève, dans ce cas, est le propre auteur de son savoir. Mon rôle n'a été que de guider, d'apporter les éléments nécessaires afin de dépasser les obstacles et d'atteindre les objectifs.".

la recherche au projet ESCALATE, mais il a également été enrichi de l'expérience de l'enseignant et de sa réflexion sur les conceptions des élèves, par un enrichissement tant sur le plan pédagogique que scientifique, puisque la *théorie* des *conceptions* des élèves et de l'*obstacle épistémologique* constitue justement un des points de départ de la recherche sur les situations de malentendu : intégrer une approche pédagogique "constructiviste" - au sens de (Courtillot & Ruffenach, 2006) - contribue à rendre plus crédible la discussion critique au niveau psychologique (concernant les processus d'apprentissage) et épistémologique (concernant les connaissances à construire et construites par les élèves).

4.5.2.1 Reprise effective du dispositif d'enseignement mi-fini

Le but principal du dispositif d'enseignement mi-fini consistait à faire émerger des pratiques d'*inquiry learning* et d'argumentation dans un établissement scolaire. L'opérationnalisation de ce but par la transmission des deux outils numériques *Marbles Move* pour l'*inquiry learning* et *Digalo* pour l'argumentation dans un dispositif d'enseignement mi-fini a parfaitement fonctionné :

— l'enseignant a surtout perçu la sollicitation du chercheur comme une offre de ressources, sous la forme d'outils numériques, et il s'est par conséquent senti libre de planifier une séquence comme il le souhaitait en mobilisant ses compétences et son expérience de la classe ;

— la mise en œuvre des outils numériques ont permis, au moins dans une certaine mesure, des activités d'*inquiry learning* et d'argumentation entre élèves, activités que l'enseignant a encore renforcées par ses apports de tâches en "situations-problèmes" particulièrement adaptées à cet objectif, et par l'ajout d'une leçon expérimentale avec du matériel concret de sa conception.

Cette réussite de la démarche de recherche collaborative permet d'examiner les hypothèses d'ingénierie didactique du dispositif d'enseignement mi-fini dans une *analyse a posteriori* (voir section 4.5.2.2 ci-dessous). Avant cela, je précise brièvement pour chacun des deux outils numériques comment ils ont été repris et adapté par l'enseignant.

Reprise du logiciel *Marbles Move* et adaptations effectuées par l'enseignant

Pour des raisons de complexité au niveau de la programmation et de la physique, et du temps à disposition, ni l'enseignant ni les élèves n'ont en fait utilisé le logiciel *Marbles Move* en tant que *micromonde*, mais plutôt comme un simulateur. Le logiciel a néanmoins été utilisé comme prévu dans le dispositif d'enseignement mi-fini, et a bénéficié d'un temps relativement extensible permettant aux élèves de terminer à leur rythme la série d'exercice. Ce logiciel visait une forme d'expérimentation virtuelle : si les élèves se sont pris au jeu du simulateur, je ne dispose d'aucune observation permettant d'affirmer que ces expérimentations ont joué un rôle dans l'acquisition de concepts, dans leur interprétation du monde physique, ou même dans les débats sur les "situations-problèmes" du pré-questionnaire. Le fait que la tâche du toboggan à billes

ne se retrouve pas dans ce pré-questionnaire a rendu de telles observations difficiles, et nous ne disposons d'aucune garantie que les élèves aient effectué un transfert entre ces tâches.

En effet, les résultats des exercices liés à l'utilisation du logiciel *Marbles Move* sont difficiles à interpréter dans ce but : toutes les feuilles d'exercices comprennent des réponses justes pour tous les exercices et pour tous les élèves, y compris les exercices nécessitant une solution algébrique ("activités 5"). D'une part, cela peut être l'indicateur d'une grande réussite de l'approche pédagogique de la série d'exercices construite pour l'usage du logiciel, mais d'autre part l'absence de contraste dans ces traces empêche l'observation de processus d'apprentissage par ce moyen. Le fait que la série d'exercices - au moins les "activités" 1 à 4 - soit conçue comme un instrument d'apprentissage contribue peut-être à rendre plus difficile l'usage des productions des élèves dans une évaluation, même diagnostique : l'approche incrémentale conduit délibérément les élèves à réussir une tâche complexe par petites étapes guidées, qui ne permet plus d'évaluer si les élèves parviendraient à produire l'analyse globale du toboggan à billes sans cette structuration et séquence de tâches bien précises.

En outre, comme le signalent Gaigher, Rogan, et Braun (2007) pour une tâche très semblable [310], la solution algébrique du problème posé ne garantit aucunement que la stratégie de résolution de la situation-problème passe effectivement par la "traduction" du problème de manière à construire des liens entre réalité, modèle, concepts et symboles notamment mathématiques), c'est-à-dire que ces résultats ne permettent pas de conclure à une conceptualisation chez les élèves. Autrement dit, cette réussite systématique peut aussi indiquer que les élèves ont pu se contenter d'une observation du simulateur pour réussir les exercices, sans devoir passer par une appropriation des concepts impliqués. La réussite tout aussi spectaculaire aux "exercices d'application" ("activités 5") m'oblige néanmoins à émettre une réserve quant à cette interprétation, d'autant plus qu'une partie de la classe (en séquence B) a effectué cette série d'exercice à domicile, en devoir.

Reprise du logiciel *Digalo* et adaptations effectuées par l'enseignant

Le logiciel *Digalo* a également été utilisé comme prévu par le dispositif d'enseignement mi-fini, et même au-delà des objectifs prévus dans son intégration à la problématique des conceptions des élèves amenées par l'enseignant. En effet, les "situations-problèmes" développées par l'enseignant se sont révélées des tâches particulièrement pertinentes pour de court débat, où les élèves ont pu s'investir dans l'usage d'une argumentation médiatisée par l'outil numérique à plusieurs reprises sur des temps courts, évitant ainsi la lassitude qu'aurait peut-être induit une discussion longue et complexe. En outre, les avis des élèves ont suffisamment divergé les uns des autres pour qu'il n'y ait pas un seul groupe débutant l'activité avec une même réponse sur la majeure partie des questions. L'installation technique du logiciel dans l'établissement scolaire a posé d'importantes difficultés, surmontées de justesse grâce aux compétences de toute l'équipe, notamment en raison de la sécurité des réseaux.

310. Conservation de la quantité de mouvement, exercice qui correspond à notre question 5b.

Un des objectifs secondaires de l'usage du logiciel *Digalo* consiste à offrir cette traçabilité des contenus. Néanmoins, dans nos observations, la perte de richesse des raisonnements se fait avant le passage à l'écrit, et en ce sens Digalo ne résout que partiellement le problème, puisque l'argumentation rédigée ne représente qu'une partie appauvrie des contenus discutés dans les groupes à l'oral. Le logiciel permet néanmoins aux élèves de passer plus de temps à élaborer leur argumentation et, surtout, à découvrir l'argumentation des autres élèves, en y prêtant une attention accrue par le fait qu'elle est écrite et postée dans le logiciel, et parfois mise explicitement en relation avec leurs propres productions.

4.5.2.2 Retour sur les hypothèses des chercheurs

Cette section permet de revenir sur les cinq hypothèses posées lors de la conception du dispositif d'enseignement mi-fini (voir section 4.3.2.7, p. 283) pour les évaluer, dans la mesure où les observations effectuées le permettent.

Hypothèse I : les élèves s'engagent dans des démarches d'*inquiry learning*

L'*inquiry learning* auquel se réfère ESCALATE et qui motive dans le dispositif d'enseignement mi-fini l'usage du logiciel *Marbles Move* dans des tâches d'expérimentation concrètes et virtuelles, comprend selon Da Silva (2004) trois tendances différentes :

— une approche qui met l'accent sur le lien entre science et société ;

— une approche *hands-on* centrée principalement sur la manipulation par les élèves d'artefacts et matériaux, permettant notamment l'accumulation de mesures ;

— une approche qui s'oriente vers une reconstruction des concepts par l'observation outillée, à l'aide d'une démarche d'*investigation*, au sens d'une *enquête*.

La séquence planifiée par l'enseignant reprend cette dimension du dispositif d'enseignement mi-fini d'*inquiry learning*, et propose une mise en œuvre plus proche de la troisième tendance citée ci-dessus : l'idée de l'enseignant d'une "expérience cruciale" sur chacune des questions du pré-questionnaire s'inscrit effectivement dans une enquête concernant les concepts de vitesse, d'accélération, de gravité et de force et des relations qu'ils entretiennent entre eux au sein de la théorie newtonienne où l'expérimentation par le élèves a fonction de "preuve", et est planifiée pour leur apporter "le fin mot de l'histoire". C'est ce qui motive l'enseignant à placer en fin de séquence la double leçon dédiée à ces expérimentations sur du matériel concret.

Hypothèse Ibis : la séquence voit émerger des discussions entre pairs, et des argumentations

La séquence effective a fait émerger des discussions entre élèves, dont l'importance relative aux autres activités est représentée dans le graphe de la figure 4.9 (ci-dessous).

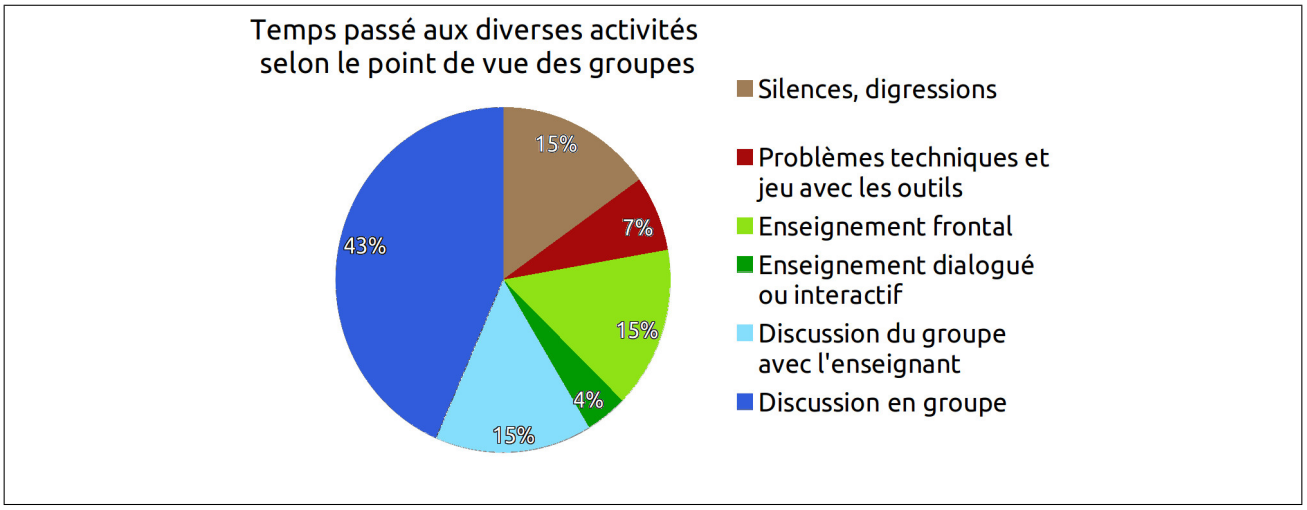


FIGURE 4.9 – Proportion des diverses activités des groupes pour l'ensemble des leçons des séquences A et B.

Ce graphe représente la synthèse d'un codage effectué par groupe sur presque [311] tous les enregistrements audio et vidéo des séquences A et B (voir figures D.1 et D.2, pp. 959-960). Les catégories affichées sont toutes mutuellement exclusives, de telle sorte qu'un seul code a été attribué à chaque instant de l'activité d'un groupe d'élèves. Les codes par types d'activité ont été attribués à des durées du temps effectif des leçons, à partir d'enregistrement audio et vidéo, en prenant en compte le point de vue du groupe :

Silence et digressions qualifie des intervalles temporels durant lesquels les élèves sont silencieux pendant plus d'une minute ou échangent des propos sans rapport ni avec les tâches scolaires ni avec les outils numériques et leur prise en main.

Problèmes techniques et jeux avec les outils qualifie des intervalles temporels durant lesquels les élèves explorent les limites ou jouent avec les outils numériques, ou sont forcés d'attendre la résolution d'une difficulté en lien avec l'usage d'un outil numérique, ou encore lorsqu'ils tentent eux-mêmes de résoudre ou prendre en main l'outil, laissant momentanément de côté la tâche scolaire en cours. Les élèves expriment oralement les difficultés rencontrées, ou leur jeu avec l'outil, le plus souvent avec des expressions d'émotions (rires, plaintes sur l'outil, etc.) qui ont rendu le repérage et le codage de ces moments relativement aisé.

Enseignement frontal qualifie des intervalles temporels durant lesquels les élèves sont occupés à écouter l'enseignant donner une consigne, une explication à toute la classe ; lorsque les élèves ignorent ces interventions de l'enseignant en poursuivant leur discussion, p.ex. en continuant de discuter de la tâche en cours, ce code n'est pas attribué au groupe. Il ne suffit donc pas que l'enseignant s'adresse à toute la classe pour que je considère qu'il y a "enseignement frontal" : il faut au moins aussi que les élèves gardent le silence et ne soient pas engagés au sein du groupe dans une autre activité discursive.

311. Les enregistrements audio et vidéo des deux leçons par postes expérimentaux n'ont pas permis de suivre les groupes d'élève dans la continuité, ce qui m'a conduit à renoncer de les inclure dans cette analyse.

Enseignement dialogué ou interactif qualifie des intervalles temporels durant lesquels les élèves sont occupés à écouter l'enseignant donner une consigne, une explication ou à leur poser des questions, en s'adressant à la classe entière et en faisant intervenir des élèves ; conformément au critère ci-dessus, les intervalles durant lesquels le groupe est engagé dans une autre activité discursive au moment où l'enseignant s'adresse ainsi à la classe reçoivent le code correspondant à cette autre activité.

Discussion du groupe avec l'enseignant qualifie des intervalles temporels durant lesquels au moins un élève du groupe est en interaction avec l'enseignant, en aparté du reste de la classe, que ce soit l'élève ou l'enseignant qui initie l'échange.

Discussion en groupe qualifie des intervalles temporels durant lesquels une majorité des élèves du groupe travaille sur une tâche scolaire, et échangent entre eux à ce propos. Ces intervalles comprennent évidemment de brefs moments silencieux, qui sont inclus dans ce code seulement s'ils n'excèdent pas une durée d'une minute.

La proportion importante (43%) de travail interactif dans les groupes d'élève indique une abondante production de discussions centrées sur les tâches scolaires, les digressions et les silences (1 minute ou plus) étant codés à part. Cet indicateur n'offre cependant qu'un aperçu de l'abondance des discussions, sans permettre de savoir si les discussions correspondent à des *argumentations*. Les traces écrites des graphes d'argumentation produit sur *Digalo* (voir annexe C, figures C.3 à C.14. pp. 905-910) permettent d'évaluer la quantité et la qualité des échanges[312]. Une analyse systématique sous cet angle reste à faire. Pour donner un aperçu de ces contributions, le tableau 4.6 (ci-dessous) présente le nombre de répliques postées par les élèves en sus de la simple expression d'une position du groupe (en général la première intervention du groupe), et qui comprenne au moins un argument relatif à la physique. Les interventions hors sujets, purement évaluatifs ou relationnels (on t'aime") n'ont pas été retenues dans ce comptage. Le nombre de groupe changeant de position, de réponse à la question posée par le questionnaire, ou qui se rétracte quant à une intervention précédente au fil de la discussion sur *Digalo* est également indiqué pour chaque graphe d'argumentation.

Graphe	Nombre de répliques argumentées (en sus de l'expression d'une position)	Changement de position par un groupe
A-1	2	non
A-2	6	non
A-3	3	non
A-4	7	non
A-5	6	non
A-6	3	*oui*
B-1	5	non
B-2	0	*oui*
B-3	3	non

312. Je n'ai pas effectué cette évaluation ici, car elle nécessite la référence à un modèle de l'argumentation parmi les nombreux existants (voir p.ex. : Eemeren et al., 2014), et ce n'est pas le but de ma démarche visant à mettre en évidence les situations de malentendu, pour laquelle j'ai adopté une définition de l'argumentation plus ouverte, celle de Grize (1995), c'est-à-dire une définition qui n'est pas *normative* et ne permet donc guère de distinguer entre une "bonne" et une "mauvaise" argumentation.

Graphe	Nombre de répliques argumentées (en sus de l'expression d'une position)	Changement de position par un groupe
B-4	6	non
B-5	4	non
B-6	2	non

TABLE 4.6 – Résultats de l'analyse des graphes d'argumentation pour les séquences A et B.

Cette brève analyse des graphes d'argumentation permet de remarquer que pour 2 graphes sur 12, au moins un groupe change de position dans le débat au cours de l'activité. Les élèves produisent 47 interventions en réponse à une ou plusieurs interventions précédemment postées et comprenant une référence à la physique, d'une manière ou d'une autre. Cela correspond en moyenne à deux interventions par élève pour l'ensemble de la leçon de 90 minutes. Il y a jusqu'à 7 répliques dans un même graphe d'argumentation.

Ces chiffres fournissent un indicateur encourageant de l'engagement des élèves dans une argumentation avec leurs pairs au cours de la leçon. Le nombre de changement de position d'un groupe d'élèves explicité sur les graphes peut paraître modeste, mais le fait qu'il y en ait constitue déjà un indicateur positif de la profondeur des échanges, compte tenu de la rareté de ces événements. Comme pratiquement tous les graphes contiennent des réponses divergentes à la "situation-problème" discutée, le peu de fréquence de changements explicites de position sur les graphes semble indique que cette leçon a plutôt été utile pour une *confrontation* des points de vue que pour leur *résolution*, ce qui était justement l'objectif de l'enseignant. Enfin, le peu de changement explicite de position peut aussi indiquer le caractère inachevé de l'exercice : la courte durée (une dizaine de minutes) des échanges pour chaque "situation-problème" n'a peut-être pas laisser suffisamment de temps aux élèves pour construire un consensus.

En outre, dans certains cas ce sont des discussions à l'interne des groupes qui conduisent à des changements de position dans le débat, ce qui n'est pas visible sur les graphes d'argumentation. C'est par exemple ce que semble indique la discussion de la "situation-problème" #2 dans la séquence B (voir figure C.10, p. 908) où les arguments ne sont pas du tout explicités sur le graphe, alors qu'un groupe change pourtant explicitement d'avis dans ses interventions sur *Digalo*. Un désaccord intra-groupe est par exemple explicitement mentionné par deux interventions sur l'un des graphes voir figure C.12, p. 909).

Hypothèse Iter : les élèves nourrissent leur argumentation des résultats de leurs démarches d'*inquiry learning*

Dans les productions écrites des élèves, que ce soit dans les réponses aux questionnaires, dans les réponses aux exercices ou sur les graphes d'argumentation (voir annexe C, figures C.3 à C.14, pp. 905-910) il n'est fait mention nulle part des résultats d'expérimentations concrète ou virtuelle - p.ex. sur le logiciel Marbles Move - pour étayer une position dans le débat. Par contre, les élèves mobilisent parfois des situations sportives vus à la télévision : p.ex. le "bobsleigh" (C.6, p. 906) ou le golfeur "Tiger Woods" (C.13, p. 909).

Les rapports expérimentaux exigeaient explicitement l'usage des résultats expérimentaux, comme "argument" en faveur de la réponse donnée à chaque "situation-problème". Malgré cette consigne explicite, les élèves ne formulent pas dans ces rapports (voir annexe C, section C.3, p. 876 et suivantes) de phrases articulant les observations et mesures, exprimées telles qu'elles, avec la réponse à la question. Une bonne partie des rapports expérimentaux ne fournissent aucun argument en faveur de la réponse et restent descriptifs, et dans les rapports où une argumentation est explicite, elle prend la forme d'un principe théorique, indiquée par les termes "toujours" ou "jamais". Un groupe d'élève écrit par exemple : "Ce sera donc toujours le même temps". Certains principes énoncés font référence à des concepts (p.ex. "on ne tient pas compte du poids", "La période d'un pendule ne dépend pas de la masse") ou à la situation analysée (p.ex. "Ici, on ne regarde pas p et s" [313]). Ce sont donc essentiellement des arguments d'autorité, basé sur des règles apprises par cœur sous le mode dogmatique discuté en introduction à cette recherche, que la démarche par *inquiry learning* et argumentation visait à dépasser pour susciter des réflexions authentiques chez les élèves.

Au vu de ces quelques observations, la séquence mise en œuvre ne semble pas répondre aux objectifs pédagogiques d'un usage par les élèves des expérimentations effectuées à un moment de la séquence dans leur argumentation à un autre moment de la séquence, malgré le fait que la séquence effective a permis aux élèves de s'engager dans ces deux types d'activités : une fois de plus, cette recherche fait le constat de la difficulté, pour les élèves, de transférer les résultats qu'ils obtiennent à une tâche scolaire pour les utiliser dans une autre.

Hypothèse II : les élèves s'engagent collectivement dans la construction d'une intersubjectivité avec leurs pairs sur les tâches qui leur sont transmises

Les observations sommaires présentées ci-dessus plaident en faveur d'un engagement des élèves dans la construction d'une intersubjectivité avec leurs pairs, et en particulier la part globale de 43% de travail sur des tâches scolaires en interaction entre pairs. En ajoutant à cette proportion les intervalles passés à échanger avec l'enseignant (15%), les élèves passent plus de la moitié (58%) du temps des leçons à discuter sur les tâches de physique. Au vu des recherches sur la structuration de l'enseignement (voir p.ex. : Seidel & Prenzel, 2006), cela fait de la séquence effective un style d'enseignement fortement orienté sur les interactions sociales entre pairs et en petits groupes avec l'enseignant. L'enseignement frontal ou interactif en classe plénière occupe environ 9 minutes sur 45 (15%+4%=19%), et les digressions ou les distraction ou temps morts dus aux outils numériques à peu près autant (15%+7%=22%). Au total, les élèves sont globalement impliqués dans la leçon plus des trois quart du temps (77%).

Les occasionnelles mentions, sur les graphes d'argumentation, de désaccords à l'intérieur des groupes plaident également pour la recherche active d'un consensus par les élèves, puisqu'ils vont jusqu'à mentionner les cas où ils n'y parviennent pas. Néanmoins, ce ne sont là que des observations générales : l'hypothèse de la construction d'une intersubjectivité ne se vérifie que pour des groupes particuliers en examinant

313. La lettre "p" indique la force correspondant au poids, "s" au soutien du sol.

spécifiquement chaque situation d'interaction à l'aide d'analyses à une échelle plus micro, ce que je n'ai pas eu les moyens de faire systématiquement. Je ne dispose donc pas suffisamment de résultats pour évaluer cette hypothèse.

Concernant les résolutions sociales ou cognitives des divergences, désaccords ou conflits socio-cognitifs entre élèves, je ne dispose pas de résultats quantitatifs. Néanmoins, les analyses menées pour identifier et décrire les situations de malentendu mettent en évidence que les deux cas de figure existent, parfois pour une même divergence entre deux élèves. Le suivi des productions écrites et par enregistrement audio et vidéo des élèves sur un semestre entier de Travaux Pratiques révèlent la grande complexité de l'évolution de ces divergences de points de vue sur le moyen terme dans une séquence où la plupart des activités sont réalisées en groupes : des élèves peuvent donner l'impression de changer d'opinion à l'occasion de la production du groupe à un moment donné, et revenir ensuite à des discours tenus antérieurement et plus éloignés des attentes de l'enseignant à un moment ultérieur. En outre, chaque fois que la tâche scolaire change, l'élève qui répond différemment ne peut pas facilement être considéré incohérent sous prétexte que les tâches sollicitent des connaissances communes du point de vue de l'enseignant ou de l'expert, car c'est justement un des enjeux de l'apprentissage de l'élève que d'identifier ce que ces tâches ont de commun ou pas.

Hypothèse III : les élèves s'engagent dans un apprentissage *profond* de la physique, allant au-delà de la seule imitation d'une procédure spécifique à la tâche.

Nous avons souligné la réflexion théorique en amont du choix d'une pédagogie centrée sur l'argumentation et l'expérimentation, visant à construire un dispositif d'enseignement permettant aux élèves de s'approprier les concepts et savoirs-faire des sciences de manière à pouvoir les mobiliser pour des tâches non-scolaires et des réflexions sur des problèmes du quotidien. Pour obtenir des apprentissages plus profonds, les tâches de la séquence ont été conçues pour mettre en défaut les stratégies du pauvre (Perrenoud, 1994/1995) des élèves qui parviennent à répondre aux consignes sans passer par les savoirs et savoirs-faire visés par le dispositif d'enseignement. La construction du questionnaire basé sur des "situations-problèmes" contribue à cet objectif en sollicitant les conceptions ou représentations personnelles des élèves. Les analyses des situations de malentendu révélera néanmoins que cette démarche soulève de nombreuses questions, sur lesquelles nous reviendrons en conclusion.

Une observation sommaire de cette idée d'apprentissage profond a été effectuée sous la forme d'un questionnaire adressé aux élèves deux ans après la séquence effective, dans l'idée générale qu'un apprentissage profond laisse des souvenirs sur le plus long terme. Sur les vingt-cinq élèves ayant participé au moins partiellement à la séquence, sept questionnaires sont parvenus en retour, pour un taux de participation de 28%. Le petit nombre de sujet et le taux de participation à cette enquête par questionnaire invite à la prudence. Les résultats sont néanmoins suffisamment homogènes pour fournir quelques renseignements sur la durabilité des connaissances acquises par les élèves en lien avec ce qui s'est passé durant la séquence d'enseignement.

Ce questionnaire comprenait une première partie de onze affirmations que les participants étaient invités à cocher s'ils s'estimaient "d'accord", portant sur leur souvenir des cours de physique au gymnase et de la séquence comprenant le logiciel Marbles Move (série S), Le questionnaire comprenait une seconde partie de six affirmations au sujet des lois de Newton (série N), visant à évaluer leurs connaissances deux ans après, auxquelles ils étaient invités à choisir entre "vrai", "faux" et " ?". Le tableau 4.7 ci-dessous présente les résultats de ce questionnaire.

N°	**Questions posées**	**Résultats**	
S-1	Je me rappelle distinctement les séances de TP effectués dans le cadre de la recherche Marbles Moves.	*d'accord*	2/7
S-2	L'enseignement de la physique en général m'a aidé à comprendre le monde matériel dans lequel je vis.	*d'accord*	2/7
S-3	Je suis content-e de ne plus devoir étudier la physique.	*d'accord*	**5**/7
S-4	Avant de lire la lettre, je ne me rappelais plus avoir participé à cette recherche.	*d'accord*	3/7
S-5	Je trouve dommage que ce que nous avons appris au Gymnase n'ait aucune utilité dans la vie courante.	*d'accord*	2/7
S-6	Le fait d'avoir étudié la physique une fois dans ma vie a une valeur personnelle pour moi.	*d'accord*	3/7
S-7	Je pense que je n'ai toujours rien compris à la physique de Newton.	*d'accord*	2/7
S-8	Le plus important, c'est que les connaissances acquises au Gymnase m'ont rendu service plus tard.	*d'accord*	1/7
S-9	Les Travaux Pratiques *Marbles Move* ont été un de mes moments préférés des leçons de physique.	*d'accord*	**4**/7
S-10	Je n'ai jamais été doué-e pour la physique, et l'enseignement du Gymnase n'y a rien changé.	*d'accord*	2/7
S-11	Aux travaux écrits, j'ai surtout cherché à obtenir une note suffisante sans trop chercher à comprendre.	*d'accord*	3/7
N-1	Je traîne une valise pleine. La valise exerce une force sur moi pendant que je la traîne.	***vrai***	**5**
		faux	2
		?	0
N-2	Lorsqu'un objet est immobile (au repos), aucune force ne s'exerce sur lui.	*vrai*	0
		faux	**7**
		?	0
N-3	La force exercée par la gravitation sur une bille en verre et celle exercée sur une bille en plastique de masse inférieure sont de même intensité.	*vrai*	**6**
		faux	1
		?	0
N-4	Tout corps exerçant une force sur un autre subit lui-même une force identique de sens contraire.	***vrai***	1
		faux	**4**
		?	2
N-5	Un volant de badminton est envoyé à vitesse constante d'une raquette à l'autre : pendant toute la trajectoire, le volant subit une force dans le sens de son mouvement.	*vrai*	0
		faux	**6**
		?	1
N-6	Tous les objets en chute libre ont la même accélération si on ne tient pas compte du frottement.	***vrai***	**6**
		faux	1
		?	0

TABLE 4.7 – Résultats du questionnaire différé (deux ans après la séquence).

Parmi la première série de questions (série S), seuls deux items obtiennent une majorité de réponse "d'accord" : S-3 ("Je suis content-e de ne plus devoir étudier la physique") et ("Les Travaux Pratiques *Marbles Move* ont été un de mes moments préférés des leçons de physique"). Pour autant que l'on puisse tirer la moindre interprétation de ces résultats, cela indiquerait que la séquence issue de la recherche a échouée à rendre la physique attractive, mais a néanmoins marqué les élèves positivement. La distribution équilibrée quant aux questions du souvenir de la recherche (S-1 et S-4), du sentiment de compétence en physique (S-7 et S-11) et des affinités pour la physique (S-6) semble indiquer que le taux de participation relativement faible n'a pas introduit de biais de sélection en faveur, p.ex., des élèves qui se souvenaient de la recherche, se sentent compétents en physique, ou encore ceux qui aiment la physique.

Parmi la seconde série de questions (série N), un profil de réponses majoritaires se dégage (indiqué en gras) malgré le petit nombre de participants. Comparé aux réponses attendues (aussi en gras), ce profil est intéressant à interpréter. Ces six questions sont construites de manière à ce que deux questions portent sur chacune des trois lois de Newton, une fois dans une modalité d'énonciation "générale", sous forme de principe, et une fois dans un cas de figure particulier, dans une modalité d'application du principe à un objet en situation (la valise, les billes en verre et en plastique, le volant de badminton). Les résultats mettent en évidence la bonne maîtrise acquise par ces étudiant-e-s de la $1^{ère}$ loi de Newton, et permettent d'identifier deux difficultés résiduelles largement partagées pour la $2^{ème}$ loi - dans la modalité "application" - et pour la $3^{ème}$ loi - dans la modalité "générale". Le tableau 4.8 synthétise ce résultat.

Modalité : / Loi de Newton :	"générale"	"application"
1) "Tout corps conserve son état de repos ou de mouvement uniforme à moins que des forces n'agissent sur lui et ne le contraignent à changer d'état." (figure B.33, p. 854)	**N-2.** Lorsqu'un objet est immobile (au repos), aucune force ne s'exerce sur lui.	**N-5.** Un volant de badminton est envoyé à vitesse constante d'une raquette à l'autre : pendant toute la trajectoire, le volant subit une force dans le sens de son mouvement.
2) "$\overrightarrow{F}_{nette} = m\overrightarrow{a}$", où $\overrightarrow{F}_{nette}$ est la somme des forces qui agissent sur un objet, m la masse de l'objet et $\overrightarrow{a}$ son accélération. (figure B.34, p. 864)	**N-6.** Tous les objets en chute libre ont la même accélération si on ne tient pas compte du frottement.	N-3. La force exercée par la gravitation sur une bille en verre et celle exercée sur une bille en plastique de masse inférieure sont de même intensité.
3) "Si une force est exercée par un objet sur un autre, une force égale en module est exercée par le second objet sur le premier, en sens opposé. $\overrightarrow{F}_{AB} = -\overrightarrow{F}_{BA}$" (figure B.34, p. 864)	N-4. Tout corps exerçant une force sur un autre subit lui-même une force identique de sens contraire.	**N-1**. Je traîne une valise pleine. La valise exerce une force sur moi pendant que je la traîne.

Table 4.8 – Synthèse des résultats de la deuxième partie du questionnaire différé.

En gras : les choix majoritaires adéquats ("vrai" si *vrai*, "faux" si *faux*) des élèves (N=7).

L'application de la $2^{ème}$ loi de Newton pose problème, alors que son principe général semble bien accepté : ce résultat est congruent avec une situation de malentendu partagée par plusieurs élèves et observée au cours de la recherche (voir section 6.6, p. 563 et suivantes), élèves pour qui l'expression "la force exercée par la gravitation" paraphrase délibérément le *poids*. Cette expression ne distingue pas précisément l'*accélération* (constante) des corps en chute libre d'une part, et le *poids* (ou *force* de gravitation exercée sur le corps) d'autre part, qui varie justement en fonction de la *masse* de l'objet.

Deuxièmement, l'énonciation de la 3ème loi de Newton sous la forme d'un principe parait fausse à la grande majorité des élèves interrogés, malgré que son application semble bien maîtrisée. Est-ce la généralité du principe qui est contestée, ou s'agit-il simplement d'une loi dont l'énonciation est trop abstraite ? Cette loi paraît-elle encore contre-intuitive, car elle est trop éloignée de l'expérience de notre action sur les choses matérielles ?

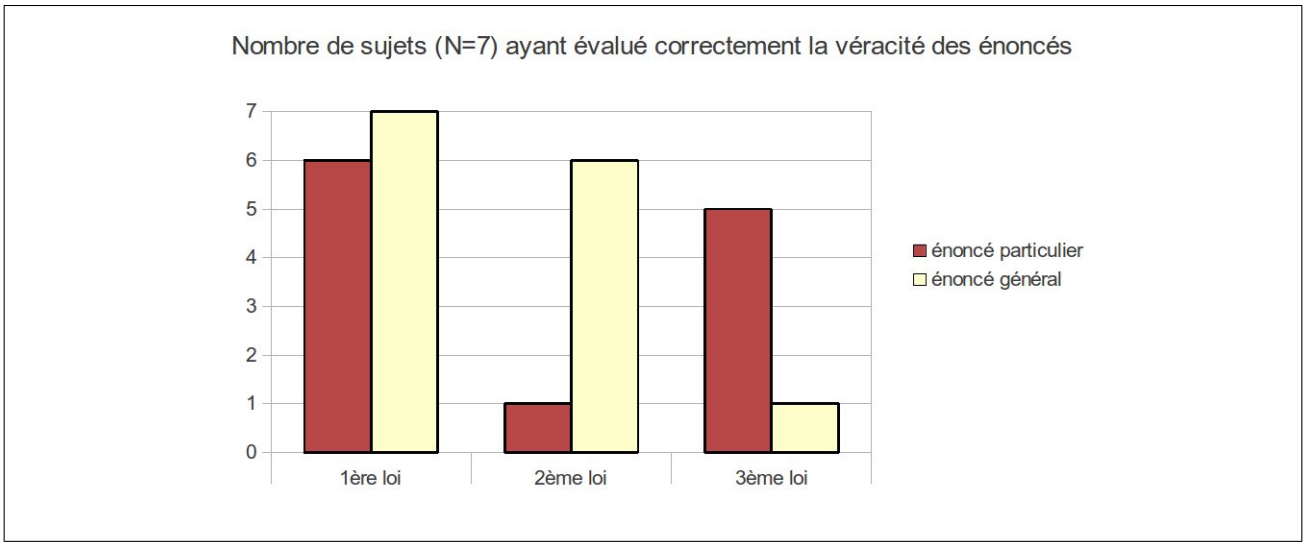


FIGURE 4.10 – Nombre d'élèves ayant émis un jugement adéquat en fonction des modalités des affirmations.

Les élèves ne se sont majoritairement trompé que pour 2 affirmations sur 6, presque toujours les mêmes (voir le tableau 4.10, ci-dessus). Les trois élèves se considérant faibles en physique (ayant coché au moins une des affirmations S-7 et S-10) ont répondu juste à la série N pour 3 ou 4 items. Les élèves ont répondu adéquatement à la série N autant pour des affirmations qu'il fallait juger "faux" (2 fois) que pour celles qu'il fallait juger "vrai" (2 fois), et les erreurs courantes sont également équilibrée (1 fois chacune) : l'énonciation d'affirmations fausses ne semble donc pas avoir introduit un biais dans le jugement des élèves.

Hypothèse IV : les élèves s'engagent à identifier les variables pertinentes et à en débattre avec leurs pairs, notamment pour construire une identité sociale positive

Même si la série d'exercices que les élèves ont effectuée avec le logiciel Marbles Move a conduit à des productions pratiquement sans erreurs, cette activité fortement structurée ne semble pas avoir conduit les élèves à développer des compétences transversales aux tâches scolaire. En effet, l'identification des variables pertinentes continue de poser des difficultés importantes aux élèves lors de l'activité d'argumentation par *Digalo*, et lors des rapports expérimentaux. Les discussions à l'oral et une partie des productions écrites montrent au moins que les élèves entrent en matière : plusieurs discussion portent spécifiquement sur le choix des variables pertinentes. Les élèves semblent néanmoins rencontrer des difficultés, souvent insurmontables sans l'aide de l'enseignant, à juger avec des critères de la pertinence d'une variable pour un problème spécifique.

Hypothèse V : les élèves prennent les logiciels en main et explorent leurs limites techniques sans que cela ne les empêche de les utiliser pour le travail attendu

La prise en main des outils numériques s'est déroulée comme prévu : alors que plusieurs élèves ont tenté de trouver des failles au logiciel *Marbles Move*, ou ont joué avec le simulateur, *Digalo* a plutôt été détourné pour envoyer des messages hors propos. Comme prévu, les outils ont néanmoins permis de résister à ces tentatives, chacun à leur manière. Le logiciel *Marbles Move* a non seulement résisté aux tentatives visant à le faire planter par une savante manipulation des paramètres, en raison d'une solidité technique, mais il a également conduit les élèves à se réorienter sur la tâche à partir de leur jeu. Le jeu le plus couramment observé parmi les élèves consiste à projeter les billes à la plus grande vitesse possible, jusqu'à les faire "sortir" de l'interface graphique à toute vitesse. Mais ce jeu-là n'est, en fait, pas très éloigné de la tâche du toboggan à billes, puisqu'elle a conduit ces élèves à s'interroger sur les variables permettant de pousser à bout le simulateur : c'était peut-être même un moment de réflexion intense sur les paramètres de la physique qui détermine le mouvement des billes et, par conséquent, une expérimentation virtuelle conduite par une réflexion personnelle et authentique des élèves, telle que décrite dans les objectifs du dispositif d'enseignement mi-fini. Comme déjà mentionné ci-dessus, les exercices avec le logiciel *Marbles Move* ont été effectués comme prévu dans l'analyse *a priori*. Je regrette néanmoins n'avoir pas prévu les moyens techniques permettant d'évaluer les apprentissages effectués par les élèves lors de ces activités.

Le recadrage des détournements d'usage du logiciel *Digalo* ont nécessité l'intervention de l'enseignant : celle-ci a néanmoins été facilité par le fait qu'il pouvait facilement suivre les interventions écrites sur les graphes d'argumentation, les échanges étant ainsi rendu visibles. En ce sens, l'outil numérique amène une transparence vis-à-vis de l'enseignant sur les échanges entre élèves, que des conversations orales au sein des petits groupes d'élèves n'ont pas, puisqu'elles sont le plus souvent inaudibles pour l'enseignant en situation de classe, même avec seulement douze élèves. Par contre, les interventions de recadrage de l'enseignant se sont faites essentiellement par oral en classe, plutôt que par la modération prévue dans le logiciel, car cette modalité s'est révélée plus rapide et efficace en situation. L'enseignant s'est contenté

d'avertir les élèves qu'il pouvait supprimer des interventions directement sur le graphe d'argumentation si nécessaire, pour convaincre les élèves de rester focalisés sur la tâche. Certains élèves ont également utilisé cette fonctionnalité pour poster une intervention hors de propos et ensuite rapidement l'effacer avant que l'enseignant n'ait eu le temps de la lire. Toutes les interventions sont néanmoins enregistrées dans le logiciel, et visible dans la fonction "replay" - mais celle-ci est trop longue à utiliser pour que l'enseignant en fasse usage pendant la leçon.

L'activité de confrontation des réponses des élèves par graphe d'argumentation semble répondre aux objectifs pour ce qui est de l'engagement des élèves dans le débat à partir de leur pensée propre. Il n'y a qu'une seule référence à un discours de l'enseignant comme argument (intervention n°80, figure C.8, p. 907) - qui d'ailleurs clôt la discussion de physique sur cette "situation-problème" - et l'élève se fait moquer par plusieurs interventions juste après ("biiiieeennn ! !vs avez compris votre TP !" et "logique qui tue"). Cet événement montre que les élèves se font eux-mêmes gardiens du cadre, d'un contrat didactique où il est essentiel de donner son avis personnel et non celui de l'enseignant. Par contre, l'usage des élèves du logiciel *Digalo* ne permet pas de montrer que les élèves ont élaboré les concepts scientifiques étudiés à un haut niveau d'abstraction, comme nous en avons fait l'hypothèse : si les graphes d'argumentation contiennent des termes faisant références aux concepts étudiés ("force", "accélération", etc.), ce langage technique et spécifique reste marginal par rapport au langage vernaculaire que les élèves emploient davantage, et n'est accompagné ni des définitions des concepts, ni de raisonnements déductifs permettant de supposer l'usage d'une pensée abstraite appliquée aux situations-problèmes. Les élèves semblent plutôt faire référence à des savoirs déclaratifs et à leur mémoire épisodique sur la manière de procéder dans telle ou telle situation.

Dans l'analyse a priori, nous avons discuté de l'importance du milieu didactique dans lequel les outils numériques sont utilisés pour discuter de leurs éventuels apports pédagogiques et de leur rôle dans les processus d'apprentissage des élèves. L'analyse de la séquence par intervalles temporels selon les types d'activité des groupes d'élèves, présentée ci-dessus au début de la section 4.5.2.2 (p. 317), permet d'explorer partiellement cette question : quelle influence les outils numériques ont-ils exercé sur les proportions d'intervalles de discussion, d'enseignement frontal, de digressions etc. ?

Une première question, que toute introduction d'outils numériques en classe soulève immanquablement chez les enseignants, porte sur le temps passé par les élèves et l'enseignant à gérer les outils (installation, dépannage, problèmes techniques, etc.). Le temps d'installation et de prise en main a été jugé important par l'enseignant, et cela malgré le soutien du chercheur. Les ordinateurs étant préparés pour les élèves pendant les pauses, et avec l'aide du chercheur, ce temps d'installation échappe à l'enquête ; celle-ci montre par contre que sur l'ensemble de la séquence, le temps passé à prendre en main les outils numériques, à aider les élèves dans leur usage, voire à dépanner les outils dans certains cas, se monte à 7% du temps total (voir figure 4.9, p. 318). Si cette proportion peut paraître importante, il convient de nuancer avec le fait qu'il s'agit le plus souvent d'intervalles temporels courts : le temps moyen des intervalles d'incidents techniques et de 1 minute et 21 secondes, et celui des intervalles de jeu avec les outils de 1 minute et 32 secondes. La plupart de ces intervalles ne provoquent donc pas d'interruption des activités des élèves, mais constituent plutôt des distractions de courtes durées permettant ensuite aux élèves d'arriver à leurs fins.

Une deuxième question, directement liées aux hypothèses de l'ingénierie didactique, porte sur le rôle que ces outils jouent dans le déroulement du temps didactique, ce que Leutenegger (2000) appelle la *chronogenèse* : l'activité médiatisée par *Digalo* a par exemple conduit à une fragmentation de la leçon de Travaux Pratiques, habituellement dédiée à une ou deux expériences de longue durée, à six débats de courte durée. Cet effet est planifié par l'enseignant lors de sa construction de la séquence. L'analyse de la séquence par intervalles temporels selon les types d'activité des groupes d'élèves permet-elle de relever des effets émergents de l'usage des outils numériques ?

À défaut d'enregistrements suffisamment précis des leçons sans outils numériques, la figure 4.11 (ci-dessous) présente une comparaison entre les résultats des analyses par intervalles temporels (voir figures D.1 et D.2, pp. 959-960) pour l'ensemble des leçons effectuées avec le logiciel *Marbles Move* et les résultats des mêmes analyses effectuées avec le logiciel *Digalo*.

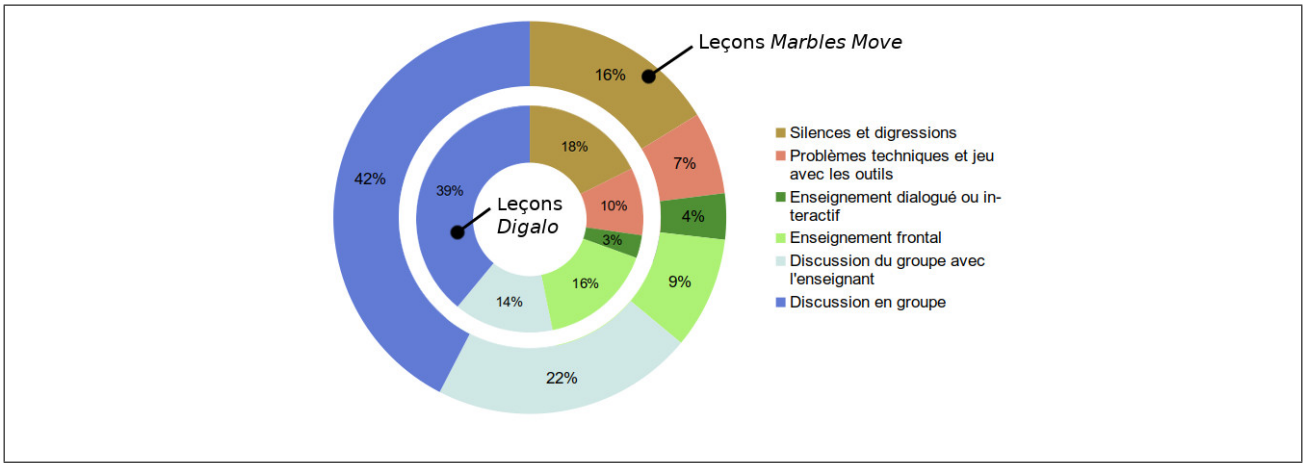


FIGURE 4.11 – Comparaison des proportions par type d'activité des groupes d'élèves entre les leçons avec *Marbles Move* et celles avec *Digalo*.

Au vu du peu de différence entre les proportions, il semblerait que les outils numériques n'aient pas eu directement un effet sur le temps que les groupes d'élève passent aux divers type d'activité. Une légère différence peut éventuellement être relevée entre la régulation des élèves par l'enseignant qui se fait plutôt en passant au sein des groupes dans les leçons avec *Marbles Move* (22% contre 9% d'enseignement frontal [314]), alors que dans les leçons avec *Digalo* l'enseignant s'adressent plutôt à toute la classe (14% de discussion avec les groupes d'élèves contre 16% d'enseignement frontal).

4.5.2.3 Retour sur les hypothèses des enseignants

Préambule

Cette section permet de revenir sur les hypothèses que l'enseignant a posées dans son ingénierie didactique. Pour cela, je me base essentiellement sur le mémoire professionnel pour ce qui est des observations

314. Je parle de "régulation" ici car la catégorie "enseignement frontal" du codage par type d'activité comprend aussi les consignes adressées à toute la classe, les éventuelles remises à l'ordre ou au travail, etc.

participantes de l'enseignant (climat de classe, satisfaction de l'enseignant quant à la séquence, etc.). Les extraits du mémoire professionnel utilisés et qui ne sont pas directement cités sont fournis en annexe, avec le statut de traces (voir annexe C, section C.5, p. 911 et suivantes). Ces observations sont complétées des analyses des performances des élèves aux questionnaires que l'enseignant effectuée pour sa recherche, et auxquelles je dispose d'un accès direct [315]. Cet accès de première main aux traces de sa recherche me permet d'adopter une posture d'auteur dans les propos qui suivent.

Le *mémoire professionnel* de l'enseignant n'est pas fourni dans son intégralité, dans le but de respecter la volonté d'anonymat de l'enseignant. Ce document n'est pas une source "neutre" pour ce qui est de l'évaluation des hypothèses de l'ingénierie didactique, puisqu'il s'agit d'un document ayant fait l'objet d'une évaluation par un formateur de la Haute École Pédagogique pour l'obtention du diplôme à l'enseignement, ce qui peut encourager un certain optimisme par rapport à la proposition pédagogique mise en œuvre par l'enseignant. Néanmoins, si j'avais mené des entretiens avec l'enseignant pour effectuer l'analyse *a posteriori*, j'aurais rencontré un problème similaire du fait de la collaboration engagée : l'enseignant interviewé se serait trouvé dans une posture encourageant également les commentaires en faveur de la recherche, du fait d'être interviewé par le chercheur d'une part, et du fait de sa participation active à l'élaboration de la séquence d'autre part. L'observation directe et outillée (questionnaires, enregistrement audio et vidéo) que j'ai pu menée me permet néanmoins de ne relayer que les propos qui ne contredise pas ces observations. À ce premier garde-fou, j'ajoute la mention d'un second : l'enseignant a bénéficié d'un accompagnement encourageant la réflexivité et l'auto-critique lors de son *mémoire professionnel*, de telle sort que les critiques constructives quant à sa proposition pédagogique peuvent non seulement être considérées comme les bienvenues dans son écrit, mais même des avantages pour la réussite de son travail de *mémoire professionnel*. Je considère donc le *mémoire professionnel* de l'enseignant peut être utilisé comme une source valable pour l'évaluation de la séquence par l'enseignant lui-même, car ce dernier s'est trouvé dans un contexte institutionnel assurant une liberté d'expression suffisante. Par contre, concernant les résultats sur les apprentissages des élèves, je fais preuve d'une plus grande réserve pour des raisons techniques liées à la difficulté méthodologique intrinsèque à la mise en évidence et description des processus d'apprentissage des élèves et des acquisitions qui en résultent, et je ne me prononce pas à ce sujet dans cette analyse *a posteriori*. Cette question plus difficile est laissée aux analyses de la recherche portant sur les situations de malentendu.

Retour sur la comparaison entre classes

Le principal objectif de l'enseignant consiste à offrir des séances de Travaux Pratiques qui marquent une différence, en termes de performances des élèves : c'est la raison pour laquelle il conçoit pour son mémoire professionnel un dispositif en pré-test - post-test qu'il fait passer à une classe parallèle du même établissement scolaire qui ne dispose pas du tout de leçons de Travaux Pratiques, et à quatre autres classes d'un autre établissement de formation. La question de la supériorité d'un enseignement disposant de deux périodes (de 45 minutes) supplémentaires à quinzaine en demi-classe sur un enseignement n'en disposant

315. L'enseignant m'a remis des copies de tous les questionnaires effectués par les élèves participants à sa recherche, aussi pour les autres classes et l'autre établissement scolaire impliqués.

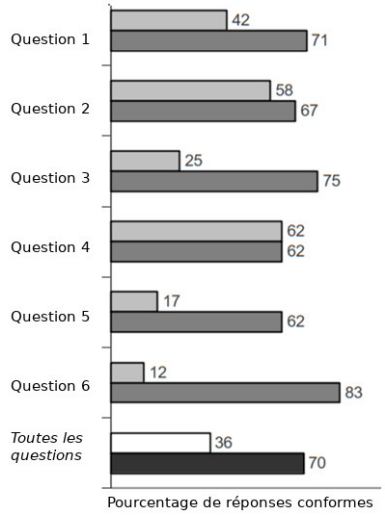
pas peut sembler, à première vue, évidente. Pourtant, du point de vue des élèves comme des enseignants impliqués dans la recherche, faire un usage adéquat de ces heures supplémentaires est loin d'être facile, et n'est certainement pas gagné d'avance. Dès lors, et par respect pour leur point de vue, je présente ci-dessous les résultats de ces comparaisons en émettant cependant deux réserves :

1. De mon point de vue, les pré-questionnaire et post-questionnaire permettent d'effectuer des mesures de performance scolaire des élèves à un moment donné, au même titre qu'une évaluation scolaire d'un autre genre, et cela malgré la conception des questionnaire et ses références à la littérature des sciences de l'éducation sur les "conceptions" des élèves : une mesure de l'apprentissage des élèves nécessiterait non seulement une analyse plus approfondie des savoirs en jeu dans chacune des "situation-problème" construite par l'enseignant, mais surtout une série d'essais pilotes de ces questions avec des analyses qualitatives des réponses pour pouvoir, *a minima*, prendre conscience de l'orientation des réponses des élèves induites par les outils, les problèmes de compréhension de consigne, les biais éventuels, etc. Or, comme c'est l'un des objectifs de la recherche sur les situations de malentendu que de soulever ces questions, je reste délibérément ici sur des résultats en terme de performance des élèves à l'évaluation diagnostique (pré-questionnaire) et formative (post-questionnaire) conçue par l'enseignant.

2. De mon point de vue, le pré-questionnaire est un instrument d'évaluation diagnostique très intéressant, en particulier dans le but d'ouvrir des discussions en liens avec les savoirs à enseigner. Son usage pour identifier des conceptions chez les élèves fera, par contre, l'objet d'une critique détaillée et circonstanciée dans la recherche sur les situations de malentendu, que je n'anticipe pas non plus ici, mais qui m'oblige à émettre une réserve quant à la pertinence des comparaisons entre les six "situations-problèmes" du pré-questionnaire avec six "situations-problèmes" en post-questionnaire construite pour évaluer les représentations des élèves des six *mêmes* objets de pensée. Si cette hypothèse paraît plus convaincante pour certains "situations-problèmes", c'est l'ensemble du raisonnement qui consiste à attribuer des conceptions stables chez les élèves à propos d'un objet identifié et délimité par les experts du domaine de connaissance - à savoir ici la physique - que je remets en cause dans cette recherche, et qui me fait ici émettre une réserve quant à la pertinence de l'appariement des "situations-problèmes" entre pré- et post-questionnaire. Cette réserve n'empêche pas, cependant, de trouver un intérêt à examiner les résultats de deux mesures de *performance* des élèves en physique portant *globalement* sur les mêmes thématiques (la cinématique et la mécanique newtonienne).

La figure 4.12 (ci-dessous) présente les performances des élèves aux six questions du pré-questionnaire et aux six questions correspondantes du post-questionnaire pour les deux classes du même établissement scolaire : celle qui a participé aux leçons de Travaux Pratiques en plus du cours théorique, et celle qui n'a bénéficié que du cours théorique, avec le même enseignant.

(a) Part de réponses conformes par questions pour la classe *avec* Travaux Pratiques (N=23/20).



(b) Part de réponses conformes par questions pour la classe *sans* Travaux Pratiques (N=15).

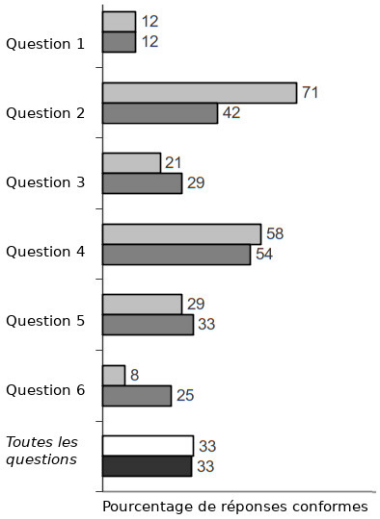


FIGURE 4.12 – Comparaison des performances des élèves aux pré-questionnaire et post-questionnaire entre deux classes du même établissement scolaire.

Le jugement de conformité des réponses aux savoirs enseignés a été effectué par l'enseignant. Les performances des élèves [316] ayant bénéficié de la séquence de Travaux Pratiques, toutes questions confondues, passent du simple au double (36% contre 70%) entre le pré-questionnaire et le post-questionnaire, alors que les performances des élèves n'ayant pas bénéficié de cette séquence restent au même niveau (33% contre 33%) pour l'ensemble des questions.

Les performances des autres classes, qui n'ont pas non plus bénéficié de ces Travaux Pratiques, ne se prêtent pas à la même comparaison car l'enseignant n'a pas fait passer le post-questionnaire. Seules les performances au pré-questionnaire peuvent être comparées : elles varient légèrement d'une classe à l'autre selon les questions, et la part de réponse conformes pour l'ensemble des questions est comprise entre 27% et 42% d'une classe à l'autre.

Retour sur les hypothèses pédagogiques : expérimentation et modélisation

L'approche pédagogique centrée sur les "situations-problèmes" et la "modélisation sur ordinateur" fait l'objet d'un bref bilan par l'enseignant dans son mémoire professionnel (pp. 31-32 du mémoire professionnel, voir extraits p. 913) : il y met en évidence que la séquence mise en place a bien fonctionné de son point de vue, en particulier concernant l'implication des élèves dans la tâche et de leur plaisir à travailler. Il relève néanmoins que la séquence a exigé un effort considérable de sa part. Il relève les observations suivantes dans son *mémoire professionnel* :

316. Tous les élèves n'étant pas présent lors des passations des questionnaires, le nombre de questionnaires à disposition pour la classe participant à la recherche (23 pour le pré-questionnaire, 20 pour le post-questionnaire dont 19 ont passé le pré-questionnaire) n'est pas identique au nombre d'élèves appartenant à la classe (N=25).

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p.25

```
Il me semble que cette séance a permis de développer de nombreuses compétences
transversales : savoir raisonner, savoir s'informer, savoir donner des hypothèses
et savoir communiquer sans oublier bien sûr le but principal de cette démarche à
savoir faire émerger les conceptions des élèves. Le programme Digalo pourra être
réinvesti dans de nombreux domaines, disciplines scientifiques ou non scientifiques.
Cependant, il faut faire attention à certaines dérives; en effet, il se peut que
cette activité se transforme en une discussion hors sujet ou "chat" entre les
élèves. C'est à l'enseignant de faire un rappel à l'ordre dans ce cas. (...)
Je n'ai pas pu aller dans les détails mais on peut constater que les réponses qui
ont été données dans le questionnaire ressemblent à celle fournies par Digalo.
En plus de cela de nouvelles notions sont apparues comme les frottements, la
masse pesante, le principe d'action et réaction et les lois de Newton. L'apparition
de nouveau vocabulaire peut être expliqué ; les élèves ont vu ces notions dans
leur cours de physique.
```

L'objectif spécifique de l'enseignant quant à l'usage du logiciel *Digalo* pour pratiquer une évaluation formative en continu des conceptions des élèves pendant l'activité s'est heurtée à des difficultés techniques - le travail de rédaction de rétro-actions par l'enseignant sur *Digalo* s'est révélé plus fastidieux pour l'enseignant que d'intervenir à haute voix directement auprès des élèves concernés - et au problème du passage à l'écrit des réflexions des élèves, qui provoque une perte importante des contenus exprimés à l'oral et que l'enseignant peut entendre directement en classe. C'est un problème connu dans la littérature sur les graphes argumentatifs, appelés "schématisations" dans le passage ci-dessous :

> *Si la schématisation conduit à une réduction des informations présentes dans l'interaction écrite, elle peut susciter la co-construction de connaissances argumentatives nouvelles. De plus, nous faisons l'hypothèse que l'activité de schématisation peut permettre aux élèves de clarifier la structure argumentative (relations argumentatives et arguments) de leur dialogue.*
>
> *(Séjourné et al., 2004, p. 10)*

Baker et al. (2003) mettent également en évidence une différence sur la forme discursive de l'argumentation, selon qu'elle est orale ou écrite :

> *Si les dialogues argumentatifs oraux se caractérisent surtout par leur "texture discursive", de reformulations successives d'énoncés, il s'est avéré que cette dimension était presque absente dans les dialogues médiatisés. Ces derniers se rapprochent davantage d'un (simple ?) échange d'arguments, dont le sens n'est que rarement négocié, que d'une inter-action au sens plus précis du terme (voir Kerbrat-Orecchioni, 1990).*
>
> *(Baker et al., 2003, pp. 9-11)*

Nous reviendrons sur la question des différences entre formes orales et écrites sur des exemples particuliers au cours de certaines analyses des situations de malentendu (voir chapitre 6).

L'enseignant conclut, au sujet de l'utilisation du logiciel *Marbles Move* (p. 26 du mémoire professionnel, voir extraits p. 911), qu'elle a permis d'introduire des activités de modélisation en classe - alors qu'elle est sinon rare voire absente de la classe - et qu'elle a suscité des échanges intéressants avec les élèves. Il souligne l'importance de la modélisation pour les apprentissages des élèves en physique :

Extraits du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p. 26

```
Certains élèves ont compris qu'un modèle ne sera jamais la réalité, en effet, "l'intérêt
d'un modèle ne se mesure pas dans sa vérité mais dans son utilité " G. de Vecchi. Le but
est aussi de familiariser les élèves avec objets mathématiques utilisés en physique
comme les vecteurs.
```

Pour l'enseignant, la dernière séance des Travaux Pratiques, consacrée aux expériences avec du matériel concret sur les six items du questionnaire et à la rédaction d'un rapport de recherche, devait jouer le rôle de fournir la réponse définitive aux situations-problèmes sur lesquelles les élèves ont été questionnés au tout début du semestre. Les attentes de l'enseignant à l'égard du rôle joué par ce qu'il avait pensé comme une *expérience cruciale* ne sont pas satisfaites : il a l'impression que l'expérimentation ne joue pas le rôle de trancher le débat qu'il a imaginé lors de sa conception de la séquence, et constate même que certains élèves s'investissent moins lors de cette leçon qu'au cours des précédentes, et dévalorise le rôle de l'expérience dans leur réflexion (p. 27 du mémoire professionnel, voir extraits p. 912).

L'insatisfaction de l'enseignant quant à cette partie de la séquence me semble plutôt relever d'attentes irréalistes de la part de l'enseignant que d'un échec pédagogique. Au contraire, les élèves semblent tout de même investis dans leurs tâches lors de ces séances si l'on s'en tient aux enregistrements audio et vidéo : ils peinent cependant à argumenter ou à réviser leurs réponses aux "situations-problèmes" du pré-questionnaire. Les difficultés que rencontrent les élèves à obtenir des mesures précises semblent contribuer à provoquer des replis, chez les élèves, au moment d'écrire la réponse aux "situations-problèmes", vers des connaissances conceptuelles ou apprises par cœur plutôt qu'à chercher à *induire* des résultats de leurs tentatives d'expérimentation.

Examinons un de ces rapports expérimentaux, pour illustrer ce point :

Rapport expérimental du groupe Annette Ferdinand Victor - item 1

```
Situation 1

Nous avons une petite balle en plastique pesant 9 grammes,
une bille de 80g et une 3ème balle de 1g. Nous voulons
voir laquelle ou lesquelles touchera/ toucheront le sol en premier.

Avec la balle à 9g nous avons 3.9 dixièmes.
Avec la balle à 80g nous avons 3.9 dixièmes.
Avec la balle à 1g nous avons 3.9 dixièmes.

Les balles ont toutes été lancées environ à la même hauteur
et ont atteint le sol quasiment toutes au même moment.
```

```
La différence que nous avons avec la 3ème balle est
sans doute due au fait que la hauteur n'était probable-
ment pas exactement la même à chaque fois. Ou aussi
avec le chronomètre manuel.
Elles arrivent toutes en même temps A LA VUE DE L'OEIL!
Si nous plaçons des capteurs, on constatera qu'il y a une légère
différence. Si nous les lançons d'une hauteur plus grande, le frottement de l'air
aura une plus grande importance et les billes ne tomberont pas en même temps.
```

Dans ce rapport, les élèves minimisent l'importance de leur observation, mettant en cause la capacité naturelle de l'œil, pour préférer voir ce qu'ils croient ou pensent connaître : il y a une légère différence, que l'oeil et le chronomètre ne permettent pas de mesurer. Cet exemple montre que malgré le dispositif didactique mettant l'accès sur l'expérimentation, celle-ci n'est pas décisive pour ces élèves : les connaissances qu'ils ont acquises de la physique participe à déterminer la construction des faits observés.

Il y a d'autres exemples qui vont dans ce sens. Par exemple, certains élèves écrivent *chariot* pour parler des voitures du dispositif expérimental :

Rapport expérimental du groupe Daniel Nina Yves - item 4

```
Le chariot n\degres2 arrive en premier, car tandis que la masse du chariot varie,
la force exercée par le ressort est le même.
```

Un autre groupe recommence deux fois la prise de mesures sur la tâche du pendule (voir annexe B, figure B.20, p. 820), avec une procédure plus rigoureuse au second essai : les élèves mesurent 10 périodes du pendule au lieu d'une seule. Ils sont alors confrontés à des résultats différents de leur première mesure et contraires aux savoirs enseignés : le pendule n'a pas tout à fait la même période avec des masses différentes suspendues au bout du fil. Voici le rapport expérimental remis par ces élèves :

Rapport expérimental du groupe Alain Etienne Pierrette - item 12

```
P1=20g P2=100g L=43cm
P1: 10T=12.87s, 12.48s: 12.675s -> 1T=1.27s
P2: 10T=12.17s, 12.02s: 12.095s -> 1T=1.21s
Le poids le plus lourd effectue un aller-retour plus vite que l'autre.
```

Dans l'exemple ci-dessus, l'imprécision des mesures conduit les élèves à remettre en question les savoirs enseignés, "à tort" dirons-nous pour faire simple. Parfois, c'est la situation inverse qui se produit : les mesures sont bonnes malgré l'imprécision du chronométrage à la main, mais les élèves en tirent une conclusion erronée. En voici un exemple :

Rapport expérimental du groupe Henriette Rose Thibault - item 4

```
m1=22.3g t1=0.34s
m2=44.7g t2=0.66s
```

```
La voiture la plus lourde met plus de temps à parcourir la même distance, avec la
même impulsion.
```

Dans l'extrait du rapport reproduit ci-dessus, le groupe donne bien la voiture plus légère ("m1") plus rapide. Par contre, la conclusion qu'ils en tirent ("La voiture la plus lourde met plus de temps à parcourir la même distance") est fausse : la voiture ayant la plus grande masse parcourrait la même distance en moins de temps si elle partait à la même vitesse que la voiture ayant la masse moindre. C'est justement ce que les élèves nomment "impulsion" - l'accélération ou la vitesse initiale de la voiture au lancer - qui fait la différence, alors que les élèves considèrent qu'elle est "la même".

À mon avis, ce sont donc plutôt les attentes de l'enseignant qui ne correspondent pas au rôle effectivement joué par l'expérience dans la construction des connaissances. En effet, du point de vue épistémologique, les attentes de l'enseignant correspondent à une vision de l'expérience où les faits s'imposent à l'observateur attentif, comme l'ont montré par exemple Driver et al. (1985) : "*believing is seeing* is sometimes more apposite than the more usual *seing is believing*" (p. 88). Or, bien que cette épistémologie soit très répandue - et même parmi les chercheurs en sciences exactes - elle est depuis longtemps dénoncée comme un mythe (Driver et al., 1996 ; Grize & de Montmollin, 2008 ; Halbwachs, 1975 ; Piaget, 1957). Il s'agit effectivement d'une vision naïve du rôle de l'expérience - notamment perceptive - dans l'élaboration des connaissances complexes, héritée du sensualisme des philosophes anglais du $XVIII^{ème siècle}$ (Locke, en particulier), pour lequel les connaissances sont *grosso modo* le résultat direct d'impressions perceptives. Or, les travaux sur l'apprentissage ont montré que l'activité d'observation est bien plus complexe qu'il n'y paraît, et implique notamment une part très active de l'observateur, notamment en terme de sélection des informations pertinentes. Cette sélection constitue une part importante de la compétence de l'expert, ce qui n'est pas sans poser des problèmes lorsqu'il s'agit de transmettre ces compétences, puisqu'il s'agit d'une part difficile à expliciter pour les experts eux-mêmes (voir p.ex. à ce sujet les travaux d'explicitation de Vermersch, 1976, 1994/2006). Ces attentes déçues quant au rôle de l'expérimentation mettent en évidence un enjeu essentiel de l'enseignement des sciences : faire comprendre que la science constitue un "raisonnement basé sur des relations" ("relation-based reasoning" Welford et al., 1996, p. 277) : ce n'est pas l'expérimentation seule qui permet l'activité scientifique, mais sa *mise en relation* avec des questions, des concepts, une théorie. Vu sous cet angle, le raisonnement des élèves cité ci-dessus d'un différence dû au frottement qu'ils ne peuvent observer à l'aide d'un chronomètre à main et de l'œil est un raisonnement scientifique - il articule leurs connaissances de la théorie newtonienne aux caractéristiques concrètes de leurs expérimentations - dont l'enseignant pourrait se réjouir.

L'embarras de l'enseignant pourrait ainsi se comprendre en prenant en compte sa position épistémologique : il oscille entre sa déception quant au rôle que devait jouer l'expérimentation des élèves à la dernière leçon de la séquence, selon cette conception sensualiste de la connaissance, et les indicateurs observés en classe qui lui font penser que les élèves ont trouvé du sens à l'activité, ont discuté entre eux, et ont fourni les rapports demandés.

4.6 Inventaires des traces à disposition

4.6.1 Transition vers la seconde recherche

Au terme de la description de cette double ingénierie didactique, par un dispositif d'enseignement mi-fini suivi de la conception d'une séquence par l'enseignant de la classe, je dispose d'un ensemble de *traces* (Lessard-Hébert, Goyette, & Boutin, 1997, p. 88) parmi lesquelles je peux mener enquête sur les éventuelles situations de malentendu. Pour cette seconde recherche, marcottée à l'ingénierie didactique présentée ci-dessus, ce chapitre constitue une description sommaire du contexte institutionnel et du milieu didactique dans lequel les traces ont été constituées. La recherche sur les situations de malentendu, dont la méthodologie est expliquée au prochain chapitre, procède à partir de ces traces pour y chercher des *indices* (Lessard-Hébert et al., 1997) permettant de reconstruire et comparer le sens que les élèves et l'enseignant donnent aux divers éléments du milieu didactique et institutionnel.

Si cette démarche ne permet pas dévaluer la fréquence ou l'importance relative du phénomène des malentendus en milieu scolaire *en général*[317], c'est qu'elle est justement orientée sur la description de situation particulière en relation avec leur contexte, dans une approche clinique qui permet de prendre en compte - par une méthodologie scientifique la plus rigoureuse possible - les différents *points de vue* exercés sur la situation par les acteurs impliqués[318]. Avant de commencer ce travail, je présente ci-dessous l'inventaire des traces à disposition de cette enquête, celle-ci se limitant évidemment à cet ensemble pour ses analyses[319].

4.6.2 Repérage en vue des prochaines analyses

Le tableau 4.13 (ci-dessous) présente l'ensemble des traces écrites à disposition de l'enquête sur les situations de malentendu.

317. Cette aventure intellectuelle se distingue de celle qui consiste à établir des statistiques par une analyse des probabilités fondée sur l'assomption d'une régularité ou répétition dans les phénomènes étudiés : elle vise à mettre en évidence des propositions dont la valeur de vérité change dans des contextes différents (Dumez, 2011, pp. 55-56), et pour lesquelles la valeur statistique de réplication n'est par conséquent pas probante.

318. Si je peux me permettre cette analyse inspirée d'une analogie avec la physique newtonienne, l'aventure intellectuelle consistant à décrire des situations de malentendu correspond à une statique des forces en physique, où il s'agit de faire l'enquête quant aux forces exercées sur l'objet, leur sens et leur direction, et leur intensité. Dans cette métaphore, les points de vue singulier que je me donne pour tâche de reconstruire correspondent aux "forces", dont je m'enquière des spécificités pour pouvoir évaluer si ces points de vue vont effectivement "dans le même sens" ou s'il y a des divergences d'une intensité suffisamment importante - au vu de l'ensemble de la *situation* - pour que j'en prenne compte dans mon *modèle*.

319. Comme la métaphore de l'enquête policière permet de le relever, la réussite d'une enquête se limite toujours aux traces effectivement laissées par les protagonistes : sa réussite n'est jamais assurée à l'avance, et son entreprise peut se relever plus ou moins difficile selon l'abondance et la pertinence de ces traces. Pour cette recherche aussi, l'enquête sur les *situations de malentendu* relève à l'origine d'un *pari* : je n'étais pas assuré d'en trouver. Pour me donner les meilleures chances de réussite, je me suis arrangé dans l'ingénierie didactique décrite ci-dessus pour produire un maximum de traces : celles-ci constituent néanmoins à plusieurs reprises une limite imposée aux analyses présentées au prochaine chapitre. Par contre, vu le nombre de *situations de malentendu* identifiées - et je ne pense pas les avoir toutes identifiées - le *pari* est réussi.

Instrument	Contenu	Modalité	Niveau	Nombre	Qualité, remarques
Pré-questionnaire : 6 questions (manuscrits sur polycopié)	Réponses Justifications	écrit	individuel	**23**	3 items sans réponse (sur un total de 126)
Série d'exercices à effectuer avec le logiciel *Marbles Move* (manuscrits sur feuilles volantes)	Réponses aux exercices (qualitatives) Dessins des forces avec vecteurs Calculs numériques	écrit	par groupe	**Tous les élèves (N=25, 8 groupes)** sauf 4 élèves absents une fois à une séance	complet (1 changement de composition de groupe)
Graphes d'argumentation produits sur *Digalo* (fichiers images, 6 couches)	Réponses et discussions entre les groupes sur les 6 items	écrit (replay)	par groupe pour les interventions, par demi-classe pour les graphes	**Tous les élèves (N=25, 8 groupes)** sauf 2 élèves absents une fois à une séance	complet
Enregistreurs audio (dictaphone ou mini-disc) posés sur les tables (fichiers audio)	Conversations entre élèves et avec l'enseignant, interventions de l'enseignant adressées à toute la classe	audio	par groupe	**Tous les élèves (N=25, 8 groupes)** sauf 3 élèves absents une fois à une séance **Enseignant**	4 enregistrements interrompus une fois pour un groupe sur une leçon
Caméra vidéo sur pied (fichiers vidéo)	Conversations entre élèves et avec l'enseignant, interventions de l'enseignant adressées à toute la classe Activités sur l'écran (*marbles move* et *digalo*) et avec les dispositifs concrets	vidéo	par groupe	**2 groupes d'élèves suivis par leçon** sauf 3 élèves absents une fois à une séance **Enseignant**	généralement de bonne qualité (technologie de 2005), sauf pour 3 enregistrements qui ont des interférences sonores
Rapports expérimentaux (manuscrits sur feuille ou cahier)	Rapports des expériences sur les 6 items	écrit	par groupe	**Tous les élèves** sauf 2 élèves absents une fois à une séance	complet
Post-questionnaire (6 questions) (manuscrits sur polycopié)	Réponses Justifications	écrit	individuel	**20 élèves** (dont 19 ont répondu au pré-questionnaire)	3 questions sans réponse (sur un total de 120)
Cours théorique dispensé par l'enseignant en parallèle (polycopié et version numérique)	Feuilles de cours distribuées avec explications, exercices, formules	écrit	par classe	**Tous les élèves** **Enseignant**	complet, avec exemplaire des exercices complétés par une élève choisie par l'enseignant pour modèle
Mémoire professionnel (document numérique)	Travail de diplôme de l'enseignant	écrit	-	**Enseignant**	complet, non reproduit dans les annexes pour respecter l'anonymat

FIGURE 4.13 – Inventaire des traces enregistrées.

Pour un repérage au fil de la séquence effective, le tableau C.2 (voir annexe C, figures C.2 et C.1, p. 874) présente l'organisation temporelle des traces utilisées lors de l'enquête en indiquant la modalité d'enregistrement. L'annexe C est dédiée à la reproduction partielle des traces inventoriées :

— les réponses écrites des élèves aux questionnaires, sur *Digalo* et dans leurs rapports expérimentaux sont reproduites dans leur intégralité à la section C.3 ;

— les graphes d'argumentations produits sur sont reproduits dans leur intégralité [320] à la section C.4 ;

— quelques extraits du mémoire professionnel de l'enseignant à la section C.5 ;

— quelques transcriptions des conversations entre élèves, et avec l'enseignant, à la section C.6.

À ces traces enregistrées s'ajoutent les observations participantes du chercheur, en particulier :

— les visites sporadiques des leçons hors de la séquence planifiée pour la recherche, qui se sont échelonnées quelques mois avant le début de la recherche jusqu'à six mois après, qui ont permis la rédaction d'une description sommaire d'une leçon habituelle de l'établissement scolaire (voir annexe D, section D.2, p. 949 et suivantes) ;

— les observations directes du déroulement des leçons lors des enregistrements (sauf pour deux d'entre elles où le chercheur a été remplacé) ;

— les échanges informels avec les enseignants de l'établissement dans divers lieux (salle des maîtres, couloirs, cafétéria, etc.) ;

— les échanges informels avec les partenaires techniques, enseignants et chercheurs de l'équipe internationale d'ESCALATE et qui ont été partiellement consignées dans un carnet de bord permettant notamment la description du processus de conception de la séquence malgré les années écoulées.

Enfin, il convient de souligner que parmi toutes les traces à disposition, l'enquête sur les situations de malentendu ne fait usage que d'une infime partie de celles-ci, et que de nombreuses autres approches pourraient être utilisées pour éclairer sous d'autres perspectives le déroulement de l'apprentissage de la physique par ces vint-cinq élèves lors de ces six mois de Travaux Pratiques. L'approche par les situations de malentendu est un choix - voir le chapitre suivant pour la justification - et la sélection parmi les traces disponibles au fil de l'enquête est aussi un choix - dont la justification est proposée au fil des analyses du chapitre 6 - que j'effectue sur la base d'une même finalité : mener la recherche sur des *situations* singulières avec un niveau de détail suffisamment élevé pour pouvoir décrire les processus qui conduisent les élèves à comprendre ou à renoncer à comprendre la physique qui leur est enseignée. Ces choix répondent à la nécessité de ce haut niveau de détail que met en évidence la psychologie microgénétique à l'aide d'une multitude d'exemples singuliers (voir p. ex. : Inhelder et al., 1992).

320. Les graphes ont parfois fait l'objet d'une intervention du chercheur consistant à déplacer des interventions, de manière à éviter leur superposition empêchant la lecture. Ces déplacements n'ont aucune influence sur les liens choisis par les élèves entre les interventions, sinon de les rendre plus visibles.

Chapitre 5

Identification et analyse des situations de malentendu

Après la présentation des traces à disposition au chapitre précédent, ce chapitre présente la démarche de traitement et d'analyse des traces. La première section est dédiée à la démarche d'identification de situations de malentendu : comment peut-on repérer ces situations ? La deuxième section présente la démarche d'analyse des situations de malentendu, en particulier la manière dont les approches théoriques sont utilisées pour poser des questions et faire des hypothèses dans la reconstruction des points de vue des acteurs, en vue d'une reconstruction des micro-genèses des situations de malentendu analysées. Finalement, j'expliciterai la façon dont est organisée la présentation des résultats dans la troisième section.

Sommaire

5.1 Identification des situations de malentendu . . . 345
5.1.1 Opérationnalisation : la notion de *moment* . . . 345
5.1.2 Méthode d'analyse des incidents critiques . . . 348
5.1.2.1 Procédure générale . . . 348
5.1.2.2 Première étape . . . 349
5.1.2.3 Deuxième étape . . . 350
5.1.2.4 Troisième étape . . . 351
5.2 Reconstruction du sens selon les points de vue des interlocuteurs . . . 355
5.2.1 Difficultés méthodologiques . . . 355
5.2.2 Une démarche abductive . . . 356
5.2.3 Une logique de l'action et des contenus . . . 356
5.2.4 Le rapport entre schématisation et pensée . . . 359
5.2.4.1 De la situation d'interlocution . . . 363
5.2.5 Reconstruire le point de vue institutionnel . . . 365

5.1 Identification des situations de malentendu

Comment repérer et identifier des situations de malentendu au sein du corpus de traces documentant l'ensemble d'une séquence d'enseignement d'un semestre ? C'est la question à laquelle je tente de répondre dans cette section, en proposant une opérationnalisation viable sur le plan pratique et théoriquement fondée.

5.1.1 Opérationnalisation : la notion de *moment*

S'intéresser aux *situations de malentendu* procède d'une approche de l'apprentissage qui se focalise non seulement sur la dimension *située* des processus étudiés, mais également sur l'importance de la dimension *temporelle* ou *dynamique*. Cette démarche poursuit l'objectif "d'analyser de plus près le dynamisme propre de ces progrès d'apprentissage" qu'investiguent Inhelder et al. (1974) à la suite des travaux de l'équipe piagétienne sur le développement des connaissances, avec cette différence que nous souhaitons ici rendre visible non pas les opérations effectuées par l'action sur des objets concrets (pâte à modeler, jetons, verres remplis de liquide, etc.) - et la coordination des schèmes progressivement construite au cours de ces actions - mais rendre visible les opérations effectuées par les élèves *sur les discours*. En ce sens, la focalisation sur les *situations de malentendu* de cette recherche s'inscrit dans la continuité des recherches sur les *situations d'apprentissage* de Inhelder et al. (1974), et transpose par analogie la méthodologie microgénétique [321] que ces travaux ont développé pour étudier les manipulations concrètes des enfants à l'étude des manipulations du discours par les élèves en milieu scolaire. Cette méthodologie me permettra de reconstruire les *cheminements de pensée* des élèves, et ensuite de les mettre en constraste avec ceux de l'enseignant, ou avec les attentes scolaires (objectifs d'apprentissage, etc.).

En ce sens, le terme *situation* (voir aussi le glossaire, p. 793 et suivantes) utilisé dans le concept de *situation de malentendu* s'entend comme un positionnement multiple : le malentendu est situé dans l'espace physique, social, culturel, mais aussi dans des temporalités [322] : celle du temps physique mesurable, mais aussi celle du temps psychologique subjectif, celle du déroulement d'une histoire singulière de l'apprentissage de la physique spécifique à chaque élève, et celle de l'histoire d'une communauté et d'une société. Sous cette dernière dimension, la *situation de malentendu* peut être abordée comme un *moment* dans le cheminement de pensée des élèves, dont la reconstruction par le chercheur décrit leur apprentissage de la physique.

Ces moments sont identifiés et délimités à l'aide de la méthodologie des incidents critiques (voir p.ex. : FitzGerald et al., 2008 ; Flanagan, 1954 ; Hughes et al., 2007), qui nous fournit l'opérationnalisation permettant le repérage d'éventuelles *situations de malentendu*. Il s'agit néanmoins d'un pari méthodologique : rien ne garantit que je trouve des *situations de malentendu* en procédant ainsi, et il me faut encore expliciter la méthode d'analyse de ces incidents critiques (voir section 5.1.2), sur laquelle repose leur évaluation en tant que *situations de malentendu*. Avant de présenter cette méthode d'analyse, je fais quelques re-

321. Je suis au regret de devoir renoncer ici à une explicitation plus complète de ce que j'emprunte à Inhelder et ses collègues, parce que cela nécessiterait un trop long développement.
322. Pour une discussion plus détaillée des diverses temporalités, voir par exemple Perret-Clermont (2005).

marques en vue du repérage d'incidents critiques potentiellement intéressants pour une analyse centrée sur le malentendu.

Si un malentendu peut se prolonger plus ou moins longtemps - jusqu'à des années dans une relation ou des siècles dans l'histoire des idées - il n'empêche qu'il émerge à un moment spécifique dans les discours et, dans bien des cas, disparaît également à un moment spécifique, par exemple lorsqu'il est éclairci par les interlocuteurs concernés. Je fais l'hypothèse que ce moment spécifique est, au moins dans certains cas, rendu visible par sa spécificité, ce qui permet de l'identifier à partir d'incidents critiques.

Si l'émergence dans le discours d'un incident critique permet d'identifier et, le cas échéant, de situer le malentendu, les processus de construction de sens des interlocuteurs qui sont impliqués dans le phénomène se déploient dans une temporalité plus longue que le moment qui permet éventuellement la description d'une *situation de malentendu* spécifique. Ces processus à l'origine de l'émergence d'une situation de malentendu précèdent ce que le chercheur peut identifier et reconstruire de la situation à partir des traces disponibles, et les éventuels effets d'une situation de malentendu peuvent également se déployer sur des temps plus ou moins longs, dont l'étendue échappe presque toujours au regard du chercheur.

Cette difficulté fournit un argument supplémentaire en faveur d'un *modus operandi* qui consiste à travailler sur des incidents critiques identifiés et sélectionnés comme autant de *moments* particuliers parmi l'ensemble des traces enregistrées des activités des élèves et de l'enseignant. Ces incidents critiques sont ensuite analysés de manière à les situer, voire à reconstruire [323] les liens qu'ils entretiennent les uns avec les autres. Ce choix méthodologique m'a conduit à proposer les résultats sous la forme d'une *collection* [324], au sens qu'utilise le botaniste menant une enquête sur la flore d'un lieu particulier à un moment spécifique de l'année. Cette métaphore vise à éclaircir l'organisation logique de la démarche scientifique que j'adopte. En particulier, elle permet de montrer que la contingence et l'arbitraire de la sélection des incidents critiques n'est pas un renoncement à la systématicité et à la rigueur scientifique, mais un report à une phase ultérieure de la démarche : le botaniste soumet son échantillon de plantes à un inventaire rigoureux et systématique, voire à des mesures, seulement après la constitution de son *herbier*, qui ne constitue que le support physique de ses études. Le marcottage de cette recherche à un corpus de traces répond à la même logique d'investigation scientifique. Ainsi, dans cette recherche, l'exigence de systématicité et de rigueur se reporte sur la démarche d'analyse des incidents critiques et sur l'enquête permettant au chercheur de considérer (ou non) qu'il s'agit, ou qu'il ne s'agit pas, d'une *situation de malentendu* pour chacun des incidents critiques collectionnés.

323. Ce n'est pas par hasard que je choisis une procédure de déconstruction - reconstruction dans un cadre épistémologique *constructiviste* : cet exercice intellectuel permet de s'affranchir au moins partiellement de l'évidence du sens qui serait "donné" d'emblée en prenant connaissance d'une situation dont l'expérience sociale et culturelle du chercheur fournit forcément des clefs de lecture inconsciente ; par la déconstruction et une reconstruction consciente de la situation des incidents critiques et du sens que peuvent lui donner les divers interlocuteurs impliqués, le chercheur peut "faire des découvertes", c'est-à-dire trouver un sens aux processus complexes étudiés qui n'apparaissait pas d'emblée.

324. Je dois cette idée à Anne-Nelly Perret-Clermont, qui a relevé des pratiques spontanées de *collection* chez les enfants et montre qu'elle constitue une structuration préfigurant la pratique scientifique (Perret-Clermont, Gertsch, Henry, Perret, & Suter, 1982).

Je ne chercherai donc ni de supposées *causes* à l'origine des *situations de malentendu*, ni non plus à en déterminer les *effets*. Plus généralement, compte tenu de la prise en compte de la dimension située et de la dynamique temporelle, la forme d'explication traditionnelle d'une relation linéaire de cause à effet est inadéquate pour modéliser le développement cognitif, comme l'exemplifie par exemple les travaux faisant usage de la théorie des systèmes dynamiques (Den Hartigh, Van Dijk, Steenbeek, & Van Geert, 2016 ; Van Geert, 1991, 1998, 2003). Or, même si cette recherche consiste en une *collection* d'enquêtes qualitatives, il s'agit bien d'une étude d'un *système* (par la prise en compte du caractère situé) *dynamique* (par la prise en compte du déroulement temporel). Par conséquent, je considère que les processus de construction des connaissances par les élèves prennent des formes non linéaires, comme Van Geert (1994) l'exemplifie dans son ouvrage. Pour Van Geert (2018), la *causalité* procède d'une *ontologie de la substance* (et de ses *propriétés*) héritée de philosophes antiques comme Aristote, qu'il propose de remplacer par une *ontologie des processus*[325], plus adaptée à l'étude des phénomènes psychologiques. Dans une *ontologie des processus*, ce n'est plus la *cause* - substance ou événement lié à une substance qu'il s'agit d'identifier - qui permet l'explication d'un phénomène, mais la *continuité*. Ce qui est traditionnellement identifié comme *cause* n'est, dans cette nouvelle ontologie, que l'état du système qui précède l'état du système au moment où le phénomène est observé : cet état n'explique rien en tant que tel ; c'est la *continuité* de l'ensemble de l'histoire du système qui fournit l'explication. Pour le chercheur qui adopte ce changement fondamental de référence à la réalité, les *discontinuités* sont particulièrement intéressantes car elles appellent une explication, que sa recherche peut fournir en rétablissement - par une méthodologie explicite et rigoureuse - la continuité qui n'était pas d'emblée apparente. L'approche par incidents critiques focalise justement la recherche sur ces moments de discontinuité propre à des trajectoires non-linéaires.

En outre, cette opérationnalisation est cohérente avec la méthode d'analyse micro-génétique décrite ci-dessous (voir la section 5.2, p. 355), qui permet de procéder de manière systématique et rigoureuse à la reconstruction du sens que les interlocuteurs donnent aux situations étudiées, et qui met l'accent sur la construction progressive des connaissances, c'est-à-dire sur des processus singuliers et situés. En effet, plusieurs chercheurs (voir p.ex. : Mercer, 2008b ; Roth, 2014) ont signalé la nécessité d'une approche méthodologique prenant en compte la dimension temporelle et dynamique des processus d'apprentissage pour comprendre ce que les élèves s'approprient effectivement de leur participation à des activités scolaires.

Ces quelques éléments permettent l'opérationnalisation suivante de la démarche :

— l'identification parmi le corpus de traces de *moments* intéressants à analyser, pour éventuellement constituer des *situations de malentendu*, procède selon la méthodologie des *incidents critiques*, permettant justement de repérer des moments particuliers au cours des *trajectoires de participation* des élèves à la construction d'une schématisation commune, normée par l'institution scolaire ;

— pour chaque moment ainsi identifié, la reconstruction des cheminements de pensée des élèves et de l'enseignant par la méthodologie microgénétique permet de fournir une description de leur point de

325. Peut-être déjà l'idée de Démocrite ?

vue, en examinant les opérations qu'ils mettent en œuvre dans leur schématisation d'un même sujet de conversation ou objet d'étude ;

— et la mise en contraste des points de vue des élèves et de l'enseignant ainsi reconstruits permet d'évaluer la pertinence, du point de vue du chercheur, de considérer la situation analysée comme une constitutive de malentendu, i.e. l'hypothèse d'une *situation de malentendu*.

5.1.2 Méthode d'analyse des incidents critiques

5.1.2.1 Procédure générale

Une fois un incident critique repéré, la question se pose de savoir s'il peut être considéré ou non comme constituant une *situation de malentendu*. Cette question requiert une décision du chercheur, qui a statut d'*hypothèse*[326], pour chaque incident critique examiné. L'hypothèse est évaluée par le chercheur au fur et à mesure de l'avancée d'une enquête sur le sens que les interlocuteurs accordent à la situation, en mettant en relation les traces disponibles et le contexte de l'activité, à la manière d'une enquête policière[327] ou archéologique.

J'ai mené ces enquêtes en suivant les trois étapes ci-dessous :

1. Sélectionner les traces documentant potentiellement un incident critique, et évaluer les cas retenus selon des critères explicites et à l'aide d'une argumentation ; décrire, le cas échéant, en quoi consiste l'incident critique.
2. Reconstruire les cheminements de pensée des interlocuteurs dans un cohérence relative à chaque point de vue impliqué dans la situation, et soulever des questions portant sur des éléments précis où les points de vue pourraient diverger entre eux.
3. Procéder à une analyse de logique naturelle conçue pour répondre aux questions soulevées à l'étape précédente, permettant de se prononcer sur l'hypothèse d'une situation de malentendu et de décrire, le cas échéant, précisément sur quoi porte le malentendu, par exemple en spécifiant les opérations logico-discursives divergentes entre les schématisation des interlocuteurs.

Malgré cette méthode d'identification et d'analyse des incidents critiques, il n'est évidemment pas certains que les indices à disposition du chercheur lui permette de se positionner en faveur ou en défaveur de l'hypothèse d'une *situation de malentendu* ; comme dans toutes les enquêtes, il y a des cas où l'enquêteur

326. Ce terme est utilisé au sens épistémologique et non au sens méthodologique strict que lui a donné la démarche de recherche expérimentale : dans ce sens, une *hypothèse* consiste à se décider - temporairement - quant à la valeur de vérité d'un énoncé, après avoir considéré un ensemble d'indices et mené une réflexion dans ce but.

327. La métaphore de l'enquête policière fournit une référence culturelle à l'exercice intellectuel exigé par cette analyse clinique : l'inspecteur se prononce, lorsqu'il juge ses indices et son raisonnement suffisamment convaincant, en faveur de l'hypothèse de culpabilité d'un suspect. Celle-ci, comme toute hypothèse, peut néanmoins être revue dès que de nouveaux éléments sont amenés à l'enquête. Cependant, dans notre enquête il n'est souvent pas possible de récolter des traces supplémentaires de l'activité comme dans une enquête policière habituelle. Et, évidemment, il n'est guère question de trouver un coupable parmi les suspects : notre enquête vise la reconstruction du sens selon plusieurs points de vue pour se prononcer sur les éventuelles divergences.

décide de renoncer à se décider par manque d'éléments, ou parce que les indices semblent contradictoires. Considérer ce positionnement neutre constitue pour le chercheur une partie intégrante de la méthode d'analyse [328].

Après l'analyse, les descriptions précises des divergences mises en évidence, le cas échéant, permettent d'ouvrir une discussion sur certains aspects précis de l'activité des élèves et de l'enseignant, et de soulever des questions relatives aux processus d'apprentissage, à des enjeux didactiques de l'enseignement des sciences, et à la dimension sémiotique des activités étudiées. Ces discussions, placées à la suite de chaque analyse des situations de malentendu au chapitre 6, ne font pas partie de la méthode d'analyse des incidents critiques présentée ici, et ne suivent aucune procédure rigoureuse et systématique : elles ont un statut de *commentaire* aux résultats de l'analyse des *situations de malentendu*, exprimant simplement l'avis de l'auteur. D'autres chercheurs peuvent commenter avec autant de légitimité les *situations de malentendu* présentées : c'est tout l'intérêt de résultats de type *descriptif* (Van der Maren, 2003) que de permettre la confrontation scientifique des points de vue sur un matériau devenu partageable et transmissible, de manière à enrichir la discussion des résultats.

Je présente ci-dessous plus en détail les actions effectuées lors de ces trois étapes.

5.1.2.2 Première étape

La première étape consiste à sélectionner les traces parmi l'ensemble du corpus. Dans ce but, les traces audio et vidéo ont été écoutées plusieurs fois de manière à identifier des épisodes constituant potentiellement un incident critique. Ces épisodes ont fait l'objet d'un codage thématique libre, en plus du codage par *type d'activité* présenté plus haut (voir chapitre 4, figure 4.9, p. 318). Cette première étape a conduit au repérage de 211 épisodes associés à 17 thèmes (voir tableau 5.1 ci-dessous [329]).

Les codes thématiques font tantôt référence à de potentielles discontinuités dans les relations entre élèves (p.ex. "résolution de conflit", "sujet socio-affectif"), dans le cours de la conversation (p.ex. "interférence entre groupes", "relation entre tâches") ou dans l'appropriation des savoirs par les élèves (p.ex. "force d'inertie", "savoir du quotidien"). Les incidents critiques ne se situent donc pas tous sur le même plan, mais j'ai volontairement ratissé large lors de cette première sélection pour éviter de passer à côté d'un événement important, et parce qu'une continuité d'un genre (p.ex. dans la relation entre les élèves) peut, après analyse, également concerner autre chose (p.ex. un désaccord sur les savoirs de physique). Plusieurs exemples de ces déplacements entre les dimensions sociales, conversationnelles et cognitives apparaissent dans les situations de malentendu analysées.

328. Cette affirmation peut paraître comme l'énonciation d'une banalité : je m'en excuse. Pourtant, dans le contexte culturel actuel d'un productivisme qui atteint aussi le milieu scientifique, l'absence qualifiée de résultats me semblait mériter cette mise en valeur.

329. Les activités de type "silence" (voir figure 4.9, p. 318) n'apparaissent pas pour une raison évidente, et les types d'activité "digression" et "problèmes techniques et jeu avec le microworld" d'une part, et "enseignant frontal" et "enseignement dialogué" d'autre part, ont été regroupés pour simplifier la présentation du tableau.

Codage thématique : / Type d'activité :	Digression, problèmes techniques	Enseignement frontal ou dialogué	Discussion avec l'enseignant	Discussion en groupe de pairs	Total
ajustement du cadre, contrat didactique	1	6	5	4	**16**
ambiguïté dans la consigne	1	7	15	9	**32**
confusion entre g et la *vitesse*			2	2	**4**
déni expérimental			1	7	**8**
désaccord sur la tâche				7	**7**
évaluation de l'activité par les élèves	8	15	1	3	**27**
expérimentations spontanées	2	1		8	**11**
interférence entre groupes	3		1	3	**7**
la *masse* cause de la *vitesse*				1	**1**
Marbles Move montre la vérité	1		1	2	**4**
mention d'une *force d'inertie*				2	**2**
relation entre tâches	3		4	2	**9**
résolution de conflit			1	1	**2**
rôle de la caméra	19	11	2	3	**35**
savoir du quotidien	1	1	1	7	**10**
sujet socio-affectif			1	6	**7**
système sémiotique	1	2	12	14	**29**
Tous les épisodes					**211**

TABLE 5.1 – Nombre d'épisodes par type d'activité et par code.

Parmi l'ensemble des épisodes inventoriés ci-dessus, seule une petite partie ont finalement été retenus - et parfois regroupés - comme des incidents critiques : ce sont les sept situations de malentendu présentées dans les résultats au chapitre 6.

Les incidents critiques retenus comportent des événements divers, sortant de l'ordinaire du point de vue du chercheur, par exemple des phénomènes de *rupture* (Kohler, 2010a) dans le cours des interactions verbales entre élèves ou dans le cours des activités, ou d'autres discontinuités [330] plus ténues de la communication entre élèves et enseignant. Parmi ces dernières, le changement de *genre conversationnel* (Schiffrin, Tannen, & Hamilton, 2005) peut constituer l'indice d'un incident critique en milieu scolaire.

5.1.2.3 Deuxième étape

Ces incidents interpellent et invitent à une enquête qui permette de reconstruire la rationalité de leur occurrence dans la singularité des situations. Autrement dit, il s'agit de retrouver la *continuité* expliquant

330. Voir la note (p. 347) sur l'*ontologie des processus* que propose Van Geert (2018).

ces incidents, qui paraissent critiques du fait que cette *continuité* n'est justement pas d'emblée évidente. Mais avant de se lancer dans l'enquête, qui constitue la deuxième étape, il convient de décrire l'incident critique et éventuellement de formuler des questions qui permettent justement de préciser en quoi consiste cet incident. En milieu scolaire, la réponse saugrenue d'un élève peut par exemple constituer un incident critique ; mais toute réponse erronée n'introduit pas forcément une discontinuité dans le cours des interactions entre élèves et enseignants ou dans la trajectoire de participation de l'élève. L'argumentation qui soutient l'identification d'un incident critique vise justement à traiter ce genre de questions. Les critères utilisés pour sélectionner les traces et établir les incidents critiques seront présentés au chapitre 6 pour chaque incident critique.

La démarche d'enquête permettant une reconstruction des cheminements de pensée des élèves selon leur point de vue et au fil du temps est expliquée plus en détail à la prochaine section (section 5.2). Cette enquête se fait à travers l'analyse de l'enchaînement conversationnel et de la construction collective de schématisations, et elle est centrée sur la dimension cognitive, c'est-à-dire dans la situation qui nous intéresse sur les interprétations et constructions de sens relatives aux activités de didactique des sciences et aux savoirs enseignés.

Selon les traces à disposition, les questions sur lesquelles porte l'enquête analytique peuvent être soulevées à la première étape de l'analyse, lors de la description de l'incident critique ou, lorsque le *problème* est moins évident, seulement après la comparaison des points de vue reconstruits par le chercheur. Soulever ces questions constitue une *problématisation* spécifique à la situation étudiée, et conduit à une démarche d'enquête qui est, elle aussi, spécifique à la situation. En ce sens, l'examen de l'hypothèse d'une *situation de malentendu* fonctionne pour chaque situation comme une recherche miniature et singulière, insérée dans une recherche plus vaste et déterminante pour des aspects plus généraux de la méthodologie, notamment la constitution du corpus de traces.

5.1.2.4 Troisième étape

Le langage de la logique naturelle est surtout utilisé pour la troisième étape de l'analyse, dans le but de pouvoir énoncer avec précision et concision les divergences entre les points de vue des interlocuteurs, tels que le chercheur a pu les reconstruire. Néanmoins, cet usage d'un langage n'a rien d'automatique et ne devrait pas occulter le fait que le chercheur procède à la reconstruction des points de vue à l'aide de savoir-faire issus de la méthodologie de l'étude de cas, de la clinique des interactions sociales et des apprentissages (Denis-Prinzhorn & Grize, 1966 ; Gilly et al., 1999 ; Grossen, 1988 ; Schubauer-Leoni et al., 1992)[331] et des analyses micro-génétiques (Tartas, 2012 ; Tartas et al., 2016 ; Wertsch, 2008). Ces savoir-faire reposent en partie sur l'observation participante (pour plus de détails, voir p.ex. : Garfinkel, 1967), en particulier pour reconstruire les attentes normatives du milieu social. Lorsque mes observations ne reposent sur aucune trace discursive ou graphique, je fais usage du conditionnel de manière à indiquer qu'il s'agit de suppositions inspirées de ma connaissance du milieu.

331. Ces références ne sont que quelques exemples parmi les travaux qui m'ont inspirés, et ne représentent qu'une petite partie des travaux dans ce domaine.

En résumé, l'analyse d'un incident critique en vue de l'identification et l'examen d'une situation de malentendu suit les trois étapes suivantes :

1. Premièrement, le repérage d'un potentiel incident critique est soumis à une évaluation selon des critères spécifiques à la recherche, permettant d'argumenter, le cas échéant, en faveur d'une discontinuité pertinente dans le contexte de l'activité. Pour cette recherche, j'ai le plus souvent confrontés les réponses données par un ou plusieurs élèves à une tâche scolaire aux réponses escomptées par l'enseignant, que ce dernier les considères correctes ou non. Ce que j'ai considéré discontinu dans l'histoire des trajectoires de participation des élèves aux savoirs enseignés de physique, ce ne sont pas tant les réponses erronées - jugement souvent discutable comme nous le verrons - mais plutôt celles qui rompent avec les normes et les attentes de l'institution et de l'enseignant. Les extraits qui n'ont pas été retenus suite à cette première phase n'apparaissent pas dans les résultats de la recherche, chapitre 6. Ceux qui ont été retenus ont conduit à la sélection explicite d'un ensemble de traces permettant de documenter - toujours de manière limitée évidemment - le *cas* de l'incident critique. Dans cette première phase, j'expose les raisons qui m'ont amené à constituer un *cas* pour une analyse, et je fais une première description de l'incident, forcément partielle, en explicitant les questions qui restent ouvertes. Cette étape fournit le point d'ancrage de l'enquête qui va suivre.

2. Deuxièmement, la sélection choisie des traces est analysées dans le détail avec une démarche d'analyse spécifiquement conçue pour traiter les questions soulevées à l'étape précédente. La question de savoir s'il y a situation de malentendu requiert une analyse des traces discursives et sémiotiques de l'activité *dans le but de reconstituer les cheminements*[332] *des interlocuteurs selon leur point de vue*, et de les comparer pour repérer d'éventuelles divergences. Cette étape permet dans un premier temps de rétablir la continuité de la micro-genèse de l'incident critique selon les points de vue de chaque interlocuteur, et la rationalité[333] spécifique à ces points de vue, souvent peu apparente dans un incident critique. Cette reconstruction est située, spécifique à la tâche, aux interlocuteurs, au moment particulier de l'activité, au contexte social, culturel et historique, etc. Cette étape permet ensuite de disposer d'une description des cheminements de pensée spécifiques aux interlocuteurs, qui rend possible leur comparaison pour discuter de la pertinence de l'hypothèse d'une *situation de malentendu*.

3. Troisièmement, si l'étape précédente permet de mettre en évidence une ou plusieurs divergences entre les points de vue reconstruits par le chercheur, il s'agit à présent d'en fournir la description la plus précise possible. Cette description est effectuée par une mise en contraste des schématisations des interlocuteurs, et requiert souvent l'usage d'un méta-langage, comme celui de la logique naturelle de Grize (1996). En effet, il est particulièrement difficile de tenter de décrire une divergence entre des schématisations d'interlocuteurs utilisant des mots dans des sens différents, en faisant usage de la même langue vernaculaire que celui des schématisations analysées et décrites : le chercheur pourrait ajouter une couche supplémentaire à la situation de malentendu s'il ne parvient pas à communiquer

332. Ce terme est emprunté à Inhelder et al. (1992).
333. Celle-ci est abordée en tant que logique naturelle des interlocuteurs, le terme *logique* étant utilisé ici dans un sens proche du sens commun, dans le but de réhabiliter la recherche sur la logique naturelle des acteurs, une tradition que (Grize, 1982, p. 26) fait remonter à Port-Royal, notamment à l'*Art de penser* de Arnauld et Nicole (1662).

les nuances pourtant essentielles à son propos [334], faute d'un langage qui permet d'exprimer ces nuances de manière univoque, comme le fournit la logique naturelle.

334. Dans certains cas, notamment lorsque l'incident critique comprend déjà plusieurs langages (p.ex. le langage mathématique) ou registres sémiotiques (graphes, esquisses, etc.), j'ai pu exposer une divergence par d'autres moyens. Ce n'est cependant souvent pas possible.

5.2 Reconstruction du sens selon les points de vue des interlocuteurs

5.2.1 Difficultés méthodologiques

Prétendre à la reconstruction du sens selon le point de vue d'un interlocuteur peut paraître une démarche douteuse, et pour cause : ce n'est pas une mince affaire, et les risques sont importants pour le chercheur de projeter ses préjugés et sa compréhension personnelle de la situation sur les points de vue des interlocuteurs dont il s'agit de faire une reconstitution la plus fidèle possible. En outre, la démarche repose sur des traces discursives, le plus souvent, dont on ne peut justement présumer qu'elles permettent un accès transparent et univoque à la pensée des interlocuteurs : il est bien connu que le langage est autant moyen de montrer ce que l'on pense que de le dissimuler...

En outre, cette reconstruction ressemble malencontreusement à une tentative de parler à la place des principaux concernés : quelle légitimité peut bien avoir un chercheur à vouloir exprimer ce qu'un élève a effectivement compris à un moment donné dans ses activités scolaires ? Ne suffit-il pas de poser la question à l'élève ? La démarche par entretien adressant la question aux élèves "qu'avez-vous appris ?" n'est malheureusement pas moins naïve que celle de la psychologie cognitive, qui consiste à tenter de reconstruire ce qui se passe dans les processus de pensée des élèves malgré eux ou à leur insu. En effet, à la question citée ci-dessus les élèves répondent bien souvent "-rien" alors que ce n'est de toute évidence pas le cas. Pouvoir demander aux élèves le sens qu'ils attribuent aux savoirs enseignés exigerait qu'ils aient une conscience sans limite de leur propre processus de pensée - on sait bien que ce n'est pas le cas. En plus, à supposer qu'ils aient suffisamment conscience de leur propre processus de pensée et d'apprentissage pour répondre ponctuellement, le problème de l'interprétation du discours qu'ils produiraient alors se pose avec la même acuité que lorsqu'il s'agit d'analyser directement des traces discursives de leurs activités scolaires : et s'ils utilisaient en s'exprimant ainsi sur leur processus de pensée un terme dans un sens différent de celui que le chercheur lui attribue ?

Vu ces difficultés, il faut bien admettre qu'il n'y a pas de solution simple au rapport entre pensée et langage pour la recherche en sciences humaines. Face à cet obstacle, j'ai opté pour une posture traditionnelle - la reconstruction du phénomène observé par le regard externe du chercheur - en misant plutôt sur un haut niveau de détail et d'explicitation de mes présupposés pour défendre la qualité scientifique de ma démarche. Le niveau de détail des analyses ne s'explique pas : il s'observe dans la présentation des résultats, au chapitre 6. L'explicitation quelques uns des présupposés méthodologiques, par contre, justifie cette section 5.2 : je tente d'exposer sur quels fondements je prétends, dans certains cas et par hypothèse, reconstruire le sens que les interlocuteurs attribuent, à un moment donné, à des éléments de la situation étudiée, selon *leur* point de vue et non du point de vue d'une théorie (p.ex. d'une théorie de l'apprentissage), d'une généralisation (p.ex. les savoirs de physique), ni non plus de mon point de vue personnel (que je réserve aux sections "discussions" qui suivent les analyses).

5.2.2 Une démarche abductive

La reconstruction du sens selon les points de vue des interlocuteurs a également statut d'*hypothèse*. Le chercheur se prononce sur le sens qu'un interlocuteur a attribué, dans une situation spécifique et l'espace d'un instant, à quelque élément (p.ex. un mot, ou une consigne scolaire) de la situation. Comment peut-on effectuer une telle science de la singularité [335] ? De quelle *hypothèse* s'agit-il ?

Puisque mes analyses reposent largement sur la logique naturelle de Grize, son explication de la logique scientifique aux fondements de cette démarche est toute indiquée pour répondre à ces questions :

> *On affirme souvent que la connaissance scientifique résulte par induction de l'observation des faits, ce qui finalement ne dit pas grand'chose. L'induction dans son acceptation commune n'est en effet que "l'opération mentale qui consiste à remonter des faits à la loi" (*Robert*). Claude Bernard cependant avait déjà insisté sur le rôle fondamental que jouait la formation d'hypothèses de sorte que pour lui, il y a bien entendu au départ l'observation des faits, mais les faits ne sont pas donnés en eux-mêmes, ils dépendent du regard que l'on porte sur les choses. Ainsi les primevères ont cinq pétales mais ce sont aussi des dicotylédones. Le regard n'est donc pas neutre et dépend de présupposés qui restent en général implicites. De là une première démarche de l'esprit,* l'abduction*, qui consiste à formuler une hypothèse, par exemple que les dicotylédones ont cinq pétales. La deuxième étape est faite de* la déduction *des conséquences de l'hypothèse, ici que si une fleur est une dicotylédone elle a cinq pétales. Enfin la troisième étape est celle de la vérification expérimentale des conséquences et c'est elle que Peirce appelle l'induction. Ce sera donc aussi par abduction que procédera essentiellement la logique naturelle.*
>
> *(Grize & de Montmollin, 2008, pp. 66-67)*

L'analyse à l'aide de la logique naturelle procède par abduction pour former des hypothèses, qui dépendent bien entendu à la fois de la sélection des traces discursives utilisées, et de l'exercice d'analyse exercé par le chercheur. En tant qu'hypothèse, les énoncés sur le sens attribué par les interlocuteurs peuvent être révisés en tout temps, notamment lorsque des traces pertinentes sont ajoutées à l'enquête, ou lors d'éventuelles erreurs lors de la mise en œuvre de l'analyse. Moyennant ces précautions d'usage, je donne ci-dessous les raisons qui permettent, à mon avis, la reconstruction du point de vue des interlocuteurs avec la logique naturelle.

5.2.3 Une logique de l'action et des contenus

Une première spécificité de la logique naturelle de Grize est de permettre des hypothèses non seulement quant aux formes, mais également sur les contenus des traces discursives. La logique naturelle est une

335. (Morin, 1982/1990, pp. 183-184) écrit à ce sujet : "D'autre part, nous savons très bien que ce que nous appelons l'ordre vivant est lié à des êtres vivants singuliers, et les espèces vivantes nous apparaissent comme des productrices / reproductrices de singularités. Donc, l'ordre n'est plus antinomique de la singularité, et cet ordre nouveau rompt avec l'ancienne conception qui disait : [i]Il n'est de science que du général[ı]. Enfin, aujourd'hui, l'ordre est désormais lié à l'idée d'interaction. En effet, les grandes lois de la nature sont devenues des lois d'interaction, c'est-à-dire ne peuvent opérer que s'il y a des corps qui interagissent, autrement dit ces lois dépendent des interactions, lesquelles dépendent de ces lois.".

logique de l'action, et de processus singuliers, qui garde la trace des contenus discursifs utilisés par les interlocuteurs, contrairement par exemple à la logique des prédicats ou à d'autres approches d'analyses du discours qui procèdent rapidement à des généralisations, ou à des catégorisations qui ne permettent plus de retrouver l'emploi spécifique d'un terme linguistique par un interlocuteur particulier à une moment de la construction de son discours.

La logique naturelle se donne comme contenu initial les *notions primitives* :

> *[S]i l'on vise à construire une logique des contenus, il faut se donner des contenus. C'est ce que fait la logique naturelle en posant l'existence de notions primitives (NP). Ce sont des contenus de pensée latents, "des systèmes de représentations complexes de propriétés physico-culturelles, c'est-à-dire des propriétés d'objet issues de manipulations nécessairement prises à l'intérieur de cultures" (Culioli). C'est à la psychologie de déterminer la façon dont les NP existent dans la pensée, la logique naturelle, elle, se contentera de poser deux opérations de sémantisation α et η, telles que :α (NP) $\Rightarrow$ nom d'objet et η (NP) $\Rightarrow$ couple prédicatif à n places.*
>
> *(Grize & de Montmollin, 2008, p. 67)*

Ces deux opérations de sémantisation peuvent être comprises comme des actes créateurs dans la construction d'un discours : à partir d'une *notion primitive*, le locuteur formule (α) un *nom d'objet* et crée ainsi du sens dans une situation particulière ; et, à partir d'une *notion primitive*, le locuteur formule (η) un *prédicat à n places* et crée ainsi du sens dans une situation particulière. Cette description est particulièrement utile au psychologue engagé dans l'analyse de l'apprentissage ou du développement en tant que processus, construction de l'histoire singulière d'un système dynamique, où les phénomènes d'émergence l'intéresse tout particulièrement. Émergence et création (de sens) sont des termes différents pour faire référence au même genre d'événement dans l'étude de la construction des connaissances : le logique naturelle permet donc de décrire ces événements dans la *construction d'une représentation discursive* (la *schématisation* de Grize) : ce n'est évidemment pas une description de la pensée de l'élève, mais le fait de pouvoir décrire un acte qui crée ou fait émerger un sens nouveau dans la schématisation place déjà l'investigation sur le genre d'événement qui nous intéresse dans une recherche sur l'apprentissage et les situations de malentendu. Il reste à discuter du lien entre *schématisation* et *pensée*, au sens plus traditionnel de la psychologie cognitive.

En sus des notions primitives - non discursives - la *logique naturelle* modélise les contenus logico-discursifs sous diverses formes, dont la plus simple est la *classe-objet*, notée "{premier mot, synonyme utilisé plus tard}" : c'est une *classe* au sens de la méréologie de Leśniewski (Grize, 1982) qui comprend les termes utilisés par l'interlocteur lui-même, les additionnant parfois au sein d'une même classe dans l'ordre de leur apparition au cours de la construction de la schématisation.

À cette logique des objets de discours, s'articule une logique des sujets discourant, indissociable de la première, et qui permet notamment d'analyser la prise en charge énonciative de ce qui est dit par les interlocuteurs : en effet, ce n'est pas parce qu'un élève prononce un énoncé qu'il y *adhère* (Grize, 1995).

Heureusement pour cette recherche, cette problématique très complexe du degré d'adhésion des locuteurs à leurs propres discours joue un rôle négligeable en milieu scolaire par rapport à d'autres milieux où les interlocuteurs sont amenés à défendre leurs intérêts ou à persuader autrui, quitte à produire délibérément des discours auxquels ils n'adhèrent pas. Du fait de l'orientation des pratiques sur l'apprentissage, et à la difficulté de concevoir le discours attendu tant que le niveau de connaissance de l'élève ne le lui permet pas, le milieu scolaire permet de considérer globalement que les interlocuteurs adhèrent aux schématisations qu'ils produisent, au moins temporairement. Cette problématique ne sera pas davantage traitée ici, et je ne dispose d'ailleurs pas de solutions viables pour étendre la démarche de recherche par *situations de malentendu* à des domaines où il n'est pas envisageable de compter sur l'adhésion des interlocuteurs à leurs propres discours.

La logique naturelle permet par contre d'apporter une solution partielle au problème [336] soulevé dans l'introduction, à savoir que les chercheurs sont souvent forcés de considérer que le sens d'un terme linguistique est identique pour tous les interlocuteurs et pour toutes les occurrences d'un même interlocuteur, pour des raisons de faisabilité des analyses, et que cela les conduit dans le cas des recherches sur l'apprentissage conceptuel à des réajustements *ad hoc* du sens attribué aux concepts par les élèves, étant donné les contradictions qui apparaissent entre les usages des termes considérés lors de diverses tâches ou à des moments différents.

En effet, si notre analyse procédera par abduction, la "deuxième étape" (voir la citation ci-dessus Grize & de Montmollin, 2008, p. 67) permet par la suite de procéder à des déduction sur la base des hypothèses établies par abduction, notamment des déductions au sujet du sens donné aux signifiants par les locuteurs. Cette démarche est ainsi construite dans le but de disposer d'un outillage d'analyse qui permet de montrer que le même terme linguistique prend des sens différents dans des usages singuliers en situation, non seulement lorsqu'il est utilisé par un locuteur différent, mais également lorsqu'il est utilisé à des moments éloignés par le même locuteur. Le sens attribué aux termes selon un point de vue particulier est reconstruit par abduction à partir d'indices discursifs et non discursifs (sous forme d'hypothèses), puis en appliquant par déduction les conséquences des ces hypothèses. Par exemple, si un élève utilise le terme "force" à un moment donné, le sens particulier qu'il donne à ce terme peut être déduit à partir des hypothèses résultant de l'examen de la phrase, d'un énoncé mathématique ou d'un dessin produit par l'élève. Si, par exemple, l'élève utilise le vocable g dans la même phrase pour désigner cette "force", je déduirai de cette synonymie (hypothèse abductive provenant de mon observation de la syntaxe de son discours écrit) que l'élève donne le sens de {force, g} à "force", sens qui diffère du coup de celui que lui donne l'enseignant pour qui g n'est pas une "force".

336. Pour une explication technique et détaillée du problème, voir les travaux de Grossen (2010) ; Salazar-Orvig et Grossen (2008), qui décrivent précisément l'enjeu en terme d'unité d'analyse et en particulier le problème posé par la reformulation pour l'analyste. Les auteurs montrent combien il est difficile d'attribuer le discours à un interlocuteur en particulier : j'espère avancer sur ce problème en ayant pris soin de choisir la focalisation de la recherche sur les *situations de malentendu* après avoir exposé quelques fondements épistémologiques de ce choix (voir section 2.2, p. 45 et suivantes) et, dans la présente section, en explicitant l'opérationnalisation et les présupposés méthodologiques, mais je suis loin de le résoudre. Par exemple, l'incompatibilité entre un niveau d'analyse se centrant sur ce qui est présent dans le discours et un niveau d'analyse reposant sur des interprétations du contexte et du cadre par le chercheur que Grossen 2010, p. 14 souligne, concerne aussi cette recherche.

En procédant de la sorte, nous verrons que l'utilisation des opérations logico-discursives dans des enquêtes spécifiques, nous permet de fournir des descriptions cohérentes des points de vue des interlocuteurs, qui rétablissent la continuité des processus aux moments des incidents critiques [337].Le contenu discursif conservé dans l'analyse permet de rattacher l'émergence du sens dans le discours analysé produit par l'élève à des éléments particuliers du milieu physique, social et sémiotique de la situation à laquelle il participe.

5.2.4 Le rapport entre schématisation et pensée

Le premier élément méthodologique à mentionner consiste à rappeler que le corpus de traces s'est construit dans une démarche de recherche collaborative basée sur l'ingénierie didactique d'un dispositif d'enseignement mi-fini permettant de maximiser les interactions verbales entre les élèves. Cette démarche contribue à rendre visible la pensée des élèves, en particulier du fait de leur travail aux tâches scolaires majoritairement en petits groupe de trois élèves ($\pm$ 1 selon les absences), où ils sont amenés à verbaliser ce qu'ils sont en train de faire pour garder leurs pairs informés. Elle conduit aussi les élèves à utiliser les interactions avec leurs pairs pour construire des connaissances - c'est en tout cas une des intentions du dispositif d'enseignement mi-fini. Cette double dimension est mise en évidence par Filliettaz (2006) à la suite d'une étude de cas dans une classe de langue : "l'argumentation ne se ramène pas nécessairement à un *contenu représenté dans le discours*, mais peut fonctionner également comme un *processus mis en pratique par le discours*" (*idem,* p. 85).

Dans la pragmatique proposée par Trognon, la compréhension mutuelle est un "processus interactif" (Trognon, 2001), ce qui a notamment deux conséquences :

— le résultat de ce processus - une certaine qualité d'intercompréhension - n'est jamais donné une fois pour toute, au sens où le processus est potentiellement repris et continué par les interlocuteurs à un moment ultérieur ;

— le processus lui-même peut faire l'objet d'une analyse, et fournit ainsi des indices au chercheur quant à la pensée des interlocuteurs.

Néanmoins, Trognon nous met en garde contre la tentation de considérer le langage comme "la fenêtre de l'esprit" (Baker, 2004), par laquelle le chercheur pourrait jeter un regard direct sur la pensée des interlocuteurs. D'autres auteurs (voir p.ex. : Edwards, 1993) mettent en garde contre ce qui serait évidemment une approche naïve du rapport entre (usage du) langage et pensée. Pour Trognon comme pour Grize, l'interaction comporte des opérations, dont certaines sont cognitives, et dont l'analyse des traces peut nous aider à reconstruire le sens donné par les interlocuteurs, mais elle ne représente pas *immédiatement* la pensée individuelle des interlocuteurs prenant part à l'interaction, pour diverses raisons :

— la pensée d'un locuteur peut justement se construire à travers le processus interactif, dans certains cas (voir p.ex. : Deleau, 1999), et tout particulièrement dans les situations d'apprentissage ;

337. Malgré cela, ces descriptions ne sont que des hypothèses résultant de l'abduction faite lors de l'analyse de logique naturelle.

— la pensée est représentée par le discours, c'est-à-dire qu'elle est mise en scène pour autrui, avec des enjeux affectifs, identitaires, voire stratégiques importants (Grize, 1982, 1996) ;

— la pensée est située à un moment particulier, en lien avec des activités, des finalités, etc. déterminées par la situation d'interlocution d'une manière qui a évidemment une influence sur le contenu même des discours construits (*ibidem*).

Baker (2004) résume la position de Trognon sur ce point délicat du rapport entre discours et pensée, et élabore en quelques lignes une position quant au rapport entre pensée et discours à laquelle je me rallie volontiers :

> *(...) l'explicitation, au sens de la verbalisation dans l'interaction d'une connaissance préformée, ne saurait exister ; les connaissances mises en jeu dans l'interaction reflètent, certes, ce que les apprenants "pensent", mais elles sont également des productions situées dans l'interaction.*
>
> *Sur le fond, je me trouve en accord avec ce dernier point de vue : le dialogue n'est pas une fenêtre sur l'esprit, il est une manifestation des esprits en inter-action. Comme l'a remarqué A. Trognon à plusieurs reprises, on ne "trouve" pas des cognitions dans une interaction (cf. des "diamants dans la boue"), mais seulement des actions collectives portant sur le plan cognitif. La cognition, vue comme une propriété épistémique et relativement stable de l'individu serait un invariant à travers ses différentes interactions, dans des situations comparables (...)*
>
> *(Baker, 2004, pp. 200-201)*

Trognon (2001) spécifie que l'étude de l'apprentissage dans l'interaction sociale ne nécessite pas l'observation des pensées des apprenants, mais peut se satisfaire d'observer les interlocuteurs essayer des interprétations au cours du processus de construction d'une compréhension mutuelle :

> *In what conditions can a speaker be certain that what his hearer understands is precisely what he/she (the speaker) wanted him to understand. In the absolute (Lewis 1969, Schiffer 1972), the speaker's intention should me mutual knowledge, that is to say, shared by the interlocutors and known to be shared. The problem is that the hearers can never be sure to have been understood. He must lower his expectations and be satisfied with less (Bach and Harnish 1979). As conversation constitues a domain for experimenting interpretations, he is however not totally deprived.*
>
> *(Trognon, 2001, p. 132)*

En effet, dans la conversation en général, cet état idéal de compréhension mutuelle n'est jamais complètement atteint, mais cela n'empêche pas d'y étudier le raisonnement. Dans la vie quotidienne, nous savons également nous contenter de moins pour établir une compréhension mutuelle à un degré suffisant pour les enjeux de la communication en question. Dans un article où il explique sa procédure d'analyse, Trognon (1989) nous invite à prendre soin de distinguer entre "interprétation locale et interprétation par récurrence d'une énonciation", pour gérer le fait que l'interprétation d'un interlocuteur peut évoluer au fil du déroulement des interactions. Il convient d'utiliser avec prudence les reprises par les interlocuteurs,

lorsqu'elles sont utilisées par les chercheur pour effectuer un "contrôle" quant au sens donnée à une intervention par un interlocuteur : cette reprise dans un énoncé subséquent n'est pas toujours l'énonciation de la même chose, mais peut au contraire constituer une réaction à l'interprétation de l'intervention précédente par son interlocuteur au cours de l'échange. Trognon ajoute même qu'il "est généralement faux que l'acte réactif soit donné comme une interprétation" :

> *Ce qui se passe, plutôt, c'est que l'enchaînement est une réaction à l'interprétation (Trognon, 1987a et b), interprétation qu'il est par conséquent pratiquement toujours nécessaire de reconstruire.*
>
> *(Trognon, 1989, p. 144)*

Ces quelques remarques fournissent de précieux éléments pour la reconstruction des schématisations à laquelle je procéderai dans l'analyse des situations de malentendu, et mettent en évidence le statut des *situations de malentendu* que nous nous sommes donnés pour tâche d'identifier et de décrire : ce sont bien évidemment des reconstructions du chercheur, avec toutes les limites que cela induit, quand bien même ces reconstructions sont établies sur la base du cadre théorique adopté au cours des précédents chapitres et sélectionné pour permettre d'analyser la pensée opérant sur les discours au plus près de son processus d'émergence et de construction dans l'interaction sociale, que ce soit au cours de conversations orales ou dans des transactions plus dispersées dans le temps et comprenant des traces écrites.

Le concept de schématisation de la logique naturelle permet de garder, tout au long de l'analyse, cette double dimension à la fois de processus de construction et de représentation logico-discursive : je peux alors mobiliser tantôt l'une ou l'autre au fil des enquêtes, en présentant plutôt la séquentialité de la construction, par exemple, ou le résultat à un moment donné du processus.

Je considérerai, lors des analyses, que la schématisation est co-construite par les interlocuteurs dans une finalité commune - celle d'enseigner-apprendre la physique ou, plus ponctuellement, de résoudre le problème qui fait l'objet d'une attention conjointe. C'est prendre au sérieux une approche du dialogue et du dialogique qui va au-delà d'une mécanique d'alternance de tours de parole, qui permet d'approcher l'activité de communication en tant qu'activité conjointe [338] et d'investiguer ce qui émerge du dialogue qui ne saurait se réduire aux activités individuelles des interlocuteurs. Jacques (1985) met en évidence ce problème dans son ouvrage *L'espace logique de l'interlocution* :

> *Dans l'analyse conversationnelle ordinaire, l'entretien est encore pensé comme un* échange *avec tours de parole. Une alternance des prestations de parole et d'écoute où chacun se borne à se faire moyen dans le projet de signifier de l'autre, pour que l'autre se fasse moyen dans son propre projet. C'est assurément mieux que rien. Personne refuse de servir la fin de l'autre. Échanges de bons procédés. Toujours est-il que les* deux *finalités discursives restent* disjointes. *Alors qu'il nous semble bien que dans un véritable dialogue, la finalité est commune. Nul ne se fait le moyen de l'autre. Chacun entre avec l'autre dans une activité de parole* conjointe. *L'un et l'autre conjuguent*

338. Au sens de l'*attention conjointe* (voir p.ex. : Bruner, 1983), sur laquelle repose largement le développement des interactions sociales chez l'être humain et d'autres espèces.

> *leurs efforts pour produire à deux* un seul *discours. Au reste, il est peu probable qu'on "échange" les vues ou les idées comme on échange des marchandises ou des coups.*
>
> *(Jacques, 1985, pp. 93-94)*

Pour tenter de dépasser cette limite, je me suis inspiré de pratiques d'analyse interlocutoire déjà présentée au chapitre 2, section 3.2.7 (p. 135 et suivantes).

En adoptant une pragmatique situationnelle, plutôt que la pragmatique des actes de langages qui est contractuelle, il y a possibilité d'intégrer la production d'un discours par des locuteurs à une analyse plus générale des actions de ces locuteurs dans un contexte :

> *En fonction des diverses approches pragmatiques existantes, on a coutume de redéfinir le locuteur. Pour la pragmatique indexicale c'est un individu concret, physiquement situé* hic et nunc. *Pour la pragmatique courante des actes de langage, c'est un partenaire contractuel caractérisé par des intentions propres. Pour la pragmatique des situations, c'est le porteur d'un ou de plusieurs rôles sociaux. Notre approche dialogique conduit à distinguer les être concrets déterminés socialement qui parlent, disons les individus, et les instances proprement énonciatives comme telles établies à travers la relation même qu'elles entretiennent. Tout message est proféré par la voix de celui qu'on appelle locuteur. D'autre part, il se donne comme mis en discours entre deux co-énonciateurs. Le langage suppose des êtres empiriques qui physiquement produisent des paroles. Mais il pose deux instances énonciatives qui surgissent de la mise en relation, quitte à se déterminer ultérieurement en leurs différences, l'une par rapport à l'autre, au cour de l'entretien. En somme, une instance de discours* suppose *deux individus et* pose *deux personnes.*
>
> *(Jacques, 1985, p. 107)*

Filliettaz (2006) propose le même changement, en opposant la "pragmatique cognitive" (p. 76) abordant les productions langagières comme un succession séquentiel et linéaire d'énoncés, à la "linguistique interactionnelle" qui revendique des formes sémiotiques organisées - les "discours" - dont la complexité nécessite de combiner l'analyse linguistique à celle du contexte.

Dans la perspective de cette recherche, qui est celle d'une psychologie de l'action, la logique naturelle permet d'aborder les schématisations - à la fois comme processus et comme produit - comme des lieux où s'observent les actions des interlocuteurs : si la schématisation n'est évidemment pas le reflet de la pensée du locuteur, les actions que celui-ci effectuent pour la construire sont des actes que je peux analyser comme tels, et l'organisation du discours résultant de la schématisation dans son ensemble à un moment donné fournissent également un matériau pour une analyse logique. Si ce n'est pas l'organisation cognitive du locuteur, c'est néanmoins l'organisation logique de son discours qu'il donne à voir, en situation : il y a là indubitablement de la pensée, *en acte*, comme le souligne Grize dans son oeuvre. Ce raisonnement est d'ailleurs aux fondements même de la logique naturelle, puisque Grize la définit ainsi :

> *J'appellerai logique naturelle l'étude des opérations de pensée qui sont en œuvre dans l'élaboration d'une schématisation.*

(Grize, 1982, p. 191)

L'analyse des opérations utilisées lors de la genèse d'une schématisation peut ainsi être utilisée pour reconstruire le sens donnée à cette schématisation, mais toujours pour un interlocuteur particulier dans une situation singulière, c'est-à-dire le sens selon un point de vue spécifique :

> *Chercher* le *sens d'une schématisation est une tâche illusoire et c'est toujours à* un *sens qu'il faut prétendre, celui que quelqu'un lui donne.*
>
> *(Grize, 1996, p. 118)*

À cet argument en faveur de la possibilité d'une étude de la pensée opérant sur le discours, s'ajoute l'argument empirique que (Inhelder et al., 1992, p. 59) appellent "la fécondité d'une analyse des micro-genèses" : les analyses détaillées de ces chercheurs leur permettent de faire des inférences quant aux significations que les sujets attribuent aux objets et à leurs propres actions. Pour ces auteurs, ces analyses permettent de reconstruire le sens que prennent des actions effectuées par des acteurs singuliers en situation :

> *Il ne s'agit pas véritablement des significations du réel interprété par le sujet, telles que la psychologie et l'épistémologie génétiques les ont mises en évidence antérieurement, mais de significations particulières aux actions orientées vers un but concret."*
>
> *(Inhelder et al., 1992, p. 59)*

La logique naturelle, en considérant une logique des actions concrètes effectuées sur le discours - les *opérations logico-discursives* - permet de décrire et de mener des enquêtes quant à ces "significations particulières aux actions orientées vers un but concret", quand bien même le but concret ici n'est pas la manipulation d'objet physique comme dans les travaux de Inhelder et al. (1992), mais la construction et élaboration de schématisations.

À partir de ces bases méthodologiques, la reconstruction du sens que les interlocuteurs attribuent par exemple aux tâches scolaires, peut être effectuée à partir des opérations sur les schématisations auxquelles ils sont confrontés - p.ex. la consigne de l'exercice - ou qu'ils créent pour répondre aux sollicitations de l'enseignant. Quelques remarques s'imposent néanmoins sur les particularités de la situation d'interlocution dans laquelle les élèves sont impliqués en milieu scolaire : il ne s'agit pas, en effet, d'une conversation tout-à-fait ordinaire.

5.2.4.1 De la situation d'interlocution

Les élèves sont plutôt habitués à travailler à des questions écrites lors de situations d'évaluation formative, typiquement des exercices d'application suivi de corrections, ou lors d'évaluation sommatives, à

savoir l'écriture en groupe sans limite de temps des *rapports expérimentaux*[339] exigés à la fin de la plupart des séances de Travaux Pratiques et conduisant à une note, ou l'écriture individuelle dans un temps limité de réponses à des questions lors de *travaux écrits*[340]. La situation d'interlocution étudiée ici se distingue cependant de ces situations bien connues des élèves par sa finalité : elle ne vise pas une évaluation sommative ni même une évaluation formative, mais une évaluation diagnostique. Dans son mémoire professionnel, l'enseignant fait explicitement référence à cette visée diagnostique du pré-questionnaire, qu'il espère lui apporter une représentation plus précise et adéquate des difficultés des élèves et de leur niveau de compétence :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p. 8

> J'ai utilisé ce type de recueil en mécanique (nda: le pré-questionnaire) au début de l'année scolaire 2006-2007: Il constituait mon évaluation diagnostique; c'est à partir de ce questionnaire que j'ai souhaité faire émerger les premières conceptions des apprenants sur certains phénomènes physiques et en particulier en mécanique. Cet outil a permis la mise en évidence, au niveau de la classe, des conceptions des élèves. J'ai également précisé aux élèves que leurs productions ne seraient pas notées mais qu'elles constitueraient un outil de travail pour tout le semestre.

Il s'agit donc d'une situation d'interlocution inhabituelle aux élèves, où ils sont avertis dès le départ qu'ils ne seront pas évalués. L'enseignant est conscient de l'aspect inhabituel de cette situation, et y réagit en insistant dans sa communication auprès des élèves :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p. 16

> J'ai précisé que ce travail ne fera pas l'objet d'une évaluation pour éviter le stress et l'angoisse chez eux. Je leur ai conseillé de prendre le temps nécessaire pour répondre à chaque situation afin d'éviter toute précipitation inutile. Les élèves ont peur de "répondre faux". J'ai ajouté que tout apprentissage implique le droit à l'erreur. J'ai bien pris conscience du problème du rapport à l'erreur qui était très présent. Ce questionnaire contient des questions de type situation-problème présentant des situations familières, où les élèves doivent prédire et expliquer ce qui va se passer. L'anticipation des phénomènes semble être un des moyens les plus efficaces pour obliger les élèves à expliciter leurs conceptions. Le fait de faire appel à des situations familières devrait favoriser la compréhension des questions, tout en limitant les réponses dans lesquelles les élèves récitent leurs cours sans donner d'explication.

Par "situation familière", l'enseignant entend ici une *situation-problème* au sens de De Vecchi et Carmona-Magnaldi (2002), qui a reçu un habillage évoquant des circonstances appartenant au quotidien des élèves, à savoir dans notre exemple le lâcher d'une balle de tennis et celui d'une boule de pétanque.

339. Il s'agit du terme local utilisé pour ce type de situation d'interlocution, qui peuvent se prolonger en devoir, la remis du rapport étant habituellement exigée pour la semaine suivant la séance de Travaux Pratiques.

340. Terme local utilisé pour ces situations d'interlocution qui sont aussi appelées *tests* ou *épreuves écrites* dans d'autres milieux, et qui sont semblables aux très connues *épreuves du baccalauréat* écrites auxquelles elles font office de préparation.

Pourtant, la question elle-même n'est pas familière aux élèves puisqu'ils débutent leur apprentissage de mécanique, et qu'il est rare de se poser une question semblable en jouant au tennis ou à la pétanque.

L'enseignant, en cadrant la situation d'interlocution de la sorte, vise un investissement des élèves qui n'est pas extrinsèquement motivé par la pression d'une évaluation, dans l'hypothèse qu'une motivation intrinsèque des élèves permette d'obtenir un engagement personnel dans les réponses qu'ils donnent, engagement personnel qu'il est planifié de solliciter plus tard dans la séquence lors des activités de discussion, de confrontation des réponses en groupe et entre groupes, et lors de la démarche d'investigation. Les élèves savent d'emblée qu'il n'y aura pas de réplique individualisée à chacune de leur réponse. Ils ne s'investissent pas moins dans leurs travaux pour autant. Tous les élèves ont répondu à toutes les questions posées, même si la durée consacrée à remplir le pré-questionnaire et le soin apporté aux réponses varient d'un élève à l'autre : certains ont écrit la justification demandée, d'autres ont répondu de manière plus minimale, fournissant des réponses parfois très courtes. Au vu des discussions entre élèves généralement nombreuses aux phases 3 et 4 de la séquence, il est permis de penser que cette situation d'interlocution a effectivement fonctionné pour la plupart des élèves comme un ancrage de la séquence dans une réflexion personnelle que les élèves poursuivent tout au long de la séquence.

5.2.5 Reconstruire le point de vue institutionnel

Chevallard (1985) pose l'existence d'un "objet de savoir" dans son modèle du "système didactique" (*idem,* p. 49), en citant comme exemples en mathématique "l'addition", "le cercle", "la dérivation". À partir de cette objectivation [341] du savoir, de nombreux auteurs des sciences de l'éducation utilisent l'expression "du point de vue du savoir", comme si le savoir constitutif d'une norme scolaire ou culturelle, était une personne. En outre, tant chez Chevallard que dans l'expression sus-mentionnée, le terme "savoir" donne faussement l'impression d'une univocité de sa signification : si l'on peut éventuellement se convaincre que "le cercle" est univoquement adopté par tous les mathématiciens dans un sens identique, il suffit de se poser la question pour des savoirs d'autres disciplines pour se rendre compte de la difficulté à laquelle cette approche nous confronte : la "mondialisation" est-elle un "objet de savoir" dont tous les géographes et historiens ont une définition unique et identique ?

En abordant les connaissances en construction des élèves comme des schématisations, dont des *objets de discours*, je devrais trouver des *objets de savoir* auxquels les comparer. Malgré une terminologie qui semble proche, le concept d'*objet de discours* est non seulement différent de celui d'*objet de savoir*, mais également incompatible : un *objet de discours* en logique naturelle est toujours l'objet du discours énoncé par une personne, alors que les *objets de savoir* sont conceptualisés comme des formes généralisées des savoirs standards dans une discipline, et ne peuvent par conséquent pas être énoncés. Je ne peux donc pas comparer les *objets de discours* des schématisations des élèves avec les *objets de savoir*, sorte d'universel qui ne peut être dit.

341. Ce modèle revient à prendre une posture philosophique *réaliste* à l'égard des savoirs : ils existeraient encore qu'aucun être humain ne serait plus présent sur Terre pour les apprendre. Je ne peux accepter cette posture, notamment du fait de mon usage de la logique naturelle, qui repose elle-même sur la théorie des classes *nominaliste* de Leśniewski, plus connue dans ses développements ultérieurs par Nelson Goodman.

Au lieu de rechercher le "point de vue du savoir", Halbwachs distingue la physique du physicien de la physique du maître, et de la physique de l'élève. Cette distinction se justifie selon cet auteur notamment par le fait que les finalités de la recherche et celles de l'enseignement sont distinctes. Quant à la physique de l'élève, elle se décrit par des significations en transformation qui ont une structure distincte de la structure des connaissances de physique du maître ou du physicien. En parlant de l'élève, Halbwachs écrit ces lignes :

> *C'est un organisme actif et réactif qui, au contact de l'enseignement, mais bien plus à travers toutes les expériences de la vie quotidienne, et avant tout à travers la coordination des actions de l'enfant lui-même, se munit à chaque stade de son développement d'une structure bien déterminée dans laquelle sont insérées et organisées les connaissances assimilées. (Halbwachs, 1975, p. 25)*

Halbwachs fait référence au cadre théorique de l'épistémologie génétique pour justifier une distinction par le fait que la mise en place d'opérations de pensée propres aux actions des apprenants ne peut que résulter en des structures cognitives qui leur sont également spécifiques, distinctes des connaissances telles qu'elles sont du point de vue de l'enseignant ou du point de vue du physicien.

Selon ces distinctions, je définis un *référentiel épistémique*[342] comprenant au moins les perspectives suivantes :

— la physique du physicien, c'est-à-dire la perspective des auteurs des significations ;

— la physique à enseigner, qui est à la fois une intention ou normes scolaire, et qui constitue la perspective d'un collectif ayant sélectionné et assimilé une partie des significations de la physique du physicien et produit des manuels scolaires, curricula, etc. ;

— la physique de l'enseignant, qui articule son assimilation de l'intention et de la normes scolaire, des manuels et curricula et de ses propres savoirs ;

— la physique enseignée, qui est la partie effectivement communiquée à travers l'ensemble du dispositif d'enseignement, et qui correspond à des significations plus ou moins fidèles à la physique de l'enseignant ;

— la physique acquise par les élèves, qui correspond à une assimilation de la physique enseignée[343] selon les structures et contenus cognitifs propres aux élèves.

Ce tableau se complexifie encore s'il l'on y ajoute la prise en compte des différences inter-individuelles : un physicien ne partage pas complètement son univers de signification avec un autre, de telle sorte qu'il serait encore plus rigoureux de parler "des physiques des physiciens", plutôt que de la généralisation "la physique du physicien".

342. Voir la discussion de ce que les sciences de l'éducation nomment parfois le "point de vue du savoir", pour lequel j'ai proposé l'usage d'une référentiel épistémique, chapitre 2, p. 71 et suivantes.

343. La présentation par la connaissance - dénommée ici *physique* en référence à ce sur quoi portent les significations considérées - fait abstraction des modes d'apprentissage, mais il demeure essentiel de garder à l'esprit en lisant cette présentation que les significations désignées par *physique enseignée*, par exemple, sont tout aussi présentes dans des interactions verbales que dans les actions des apprenants au sein de dispositif didactique.

Après avoir vainement tenté de trouver ces définitions univoques pour les "objets de savoir" de physique[344], je me suis résolu à réserver le concept de *point de vue* à des personnes réelles et concrètes : ce n'est pas seulement une manière plus confortable de faire une psychologie - dont l'objet d'investigation sont justement les personnes - mais c'est aussi une manière de respecter les engagements épistémologiques et théoriques pris jusqu'ici pour cette recherche : le *constructivisme interactionniste symbolique* (ou *sémiotique*) est une posture épistémologique de la *construction* de la réalité psychique (parmi laquelle je m'intéresse plus particulièrement aux processus d'apprentissage) d'une personne en *interaction* avec d'autres personnes, notamment par l'intermédiaire de *signes* que ces personnes produisent et utilisent ; les situations étudiées impliquent des personnes qui agissent, et les traces analysées sont les traces de leur action ; la logique naturelle est la logique de l'action de ces personnes - situées de multiples manières - dans leur usage personnel de signes de diverses natures, agissant sur des objets de discours qu'ils créent ou reprennent à d'autres personnes. Je ne vois pas où, dans ce champ d'investigation, seraient suspendus des "objets de savoir" sans personne.

Pour ces raisons, j'ai décidé de ne pas considérer les réponses des élèves comme "justes" ou "erronées", mais d'examiner leur *rapport de conformité* au point de vue de l'enseignant - le *conforme au dit* - dans une démarche fondée sur le concept de psychologie sociale de conformité. Cette manière d'aborder le problème de la pertinence des réponses des élèves en milieu scolaire permet d'effectuer mes analyse de sémiologie et de psychologie en gardant un point de vue neutre quant aux savoirs : j'examine l'*usage social* des signes dans ma pratique de la sémiologie, notamment leur *conformité*, et j'examine les interactions sociales et leurs rapports complexes à la situation, et les cheminements de pensée dans ma pratique de la psychologie. Cela me permet également de distinguer les *savoirs enseignés* - en rapport desquels je peux traiter la question de la *divergence* par la *conformité au dit* - des savoirs du physicien, notre référent épistémique, qui nécessite une tout autre forme de discussion que la question du jugement scolaire d'une réponse "juste" ou "erronée", à savoir une analyse historico-culturelle que j'ai remise à l'épilogue (voir section 8, p. 709 et suivantes). Du fait que le milieu scolaire est bien éloigné du milieu de l'activité réelle où s'effectuait traditionnellement l'apprentissage pendant de nombreux siècles, ces choix sont pertinents pour notre époque historique puisqu'ils permettent d'aborder le processus d'apprentissage comme une conversation effectuée en milieu institutionnel, en se focalisant sur ses aspects sémiotiques, sociaux et historico-culturels en plus des aspects cognitifs plus couramment abordés.

344. Autrement dit, je pense que *la physique* n'existe pas : il n'y a qu'un conglomérat de physiciens et de physiciennes vivants, leur physique à chacune et à chacun, et des traces sémiotiques ou technologiques laissées par les physiciens et physiciennes de hier et d'aujourd'hui. Dit autrement encore, *la physique* n'est rien de plus qu'un *objet de discours* : elle n'a pas d'existence psychologique, sinon pour des physiciennes et des physiciens particuliers. Cela revient à adopter, en bref, une posture nominaliste en psychologie.

Troisième partie

Résultats

Rappelons que nulle technique de communication, du téléphone à Internet, n'apporte d'elle-même la compréhension. La compréhension ne saurait être numérisée. Éduquer pour comprendre les mathématiques ou telle discipline est une chose ; éduquer pour la compréhension humaine en est une autre. L'on retrouve ici la mission proprement spirituelle de l'éducation : enseigner la compréhension entre les personnes comme condition et garant de la solidarité intellectuelle et morale de l'humanité.

(Morin, 1999, p.51)

Chapitre 6

Situations de malentendu dans des activités de didactique des sciences

Ce chapitre présente une collection de situations de malentendu, à la manière des *herbiers* en botanique. Les situations présentées n'ont pas pour fonction de représenter un phénomène plus général, et je ne prétends pas non plus à une quelconque typicité de leur part. Cette collection fournit néanmoins des phénomènes qu'une investigation scientifique peut tenter de déchiffrer et décrire à partir des traces écrites ou orales laissées par les participant-e-s lors des activités en milieu naturel. Chaque section est dédiée à un incident critique et suit le même plan de présentation, expliqué ci-dessous. La description et l'analyse sont effectuées à partir des approches psychologiques présentées dans la première partie, selon la démarche méthodologique expliquée en détail au chapitre 6.

Les sections sont présentées dans un ordre qui prend en considération le type d'incident critique : les situations #1 à #4 ont été identifiées à partir d'incidents critiques qui sont des erreurs particulières à des exercices individuels au format papier ; les situations #5 et #6 sont identifiées à partir d'un incident critique lors d'une conversation à l'oral, entre élèves et enseignant (#5) ou entre élèves (#6), alors que la situation #7 est plus diffuse, au sens où c'est une diversité de pratiques qui est considérée "critique".

Sommaire

6.1 Introduction . . . 381
6.1.1 Démarche d'exposition des situations . . . 381
6.1.2 Références aux lois de la physique . . . 381
6.2 Situation #1 : *la Lune est en chute libre...* . . . 383
6.2.1 Résumé . . . 383
6.2.2 Présentation de l'incident critique . . . 384
6.2.2.1 Présentation de la tâche . . . 384
6.2.2.2 Présentation des réponses escomptées . . . 385
6.2.2.3 Présentation des traces laissées par l'élève . . . 388
6.2.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 391
6.2.3.1 Schématisation de l'enseignant . . . 391
6.2.3.2 Schématisation de Pauline : son cheminement . . . 394
6.2.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 396
6.2.4.1 Première hypothèse : *difficulté à choisir une valeur pour la distance* r . . . 396
6.2.4.2 Seconde hypothèse : *difficulté à interpréter la mise en page* . . . 397
6.2.4.3 Énonciation des divergences selon les points de vue . . . 399
6.2.5 Discussion . . . 401
6.3 Situation #2 : *g comme gravité.* . . . 405
6.3.1 Résumé . . . 405
6.3.2 Présentation des incidents critiques . . . 406
6.3.2.1 Présentation de la tâche . . . 406
6.3.2.2 Présentation des réponses escomptées . . . 406
6.3.2.3 Présentation des traces . . . 409
6.3.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 415
6.3.3.1 Schématisation de l'enseignant . . . 415
6.3.3.2 Schématisations des élèves : leurs cheminements . . . 417
6.3.4 Enquête quant à une ou plusieurs situations de malentendu . . . 423
6.3.4.1 Enquête quant à une situation de malentendu pour le premier cheminement : *de {même force} à diverses réponses* . . . 423
6.3.4.2 Enquête quant à une situation de malentendu pour le deuxième cheminement : *de {frottement, force qui freine} à une chute simultanée* . . . 427
6.3.4.3 Enquête quant à une situation de malentendu pour le troisième cheminement : *de {masse} à la boule de pétanque première* . . . 429
6.3.5 Évolution de la situation de malentendu portant sur la reprise indifférenciée par les élèves de deux classes-objets de l'enseignant . . . 433

6.3.5.1 Introduction . . . 433
6.3.5.2 Moment #1 : l'exercice écrit et en groupe à l'aide du logiciel *Marbles Move* 433
6.3.5.3 Moment #2 : conversation écrite médiatisée par le logiciel *Digalo* . . . 435
6.3.5.4 Moment #3 : réponse écrite et de groupe dans le rapport expérimental . 438
6.3.6 Discussion . . . 441
6.3.6.1 Analyse des implicites à la situation d'interlocution . . . 442
6.3.6.2 Analyse de la construction de l'item #1 par l'enseignant . . . 452
6.3.6.3 Éclairage quant aux difficultés des élèves à apprendre la physique . . . 460
6.3.6.4 La fabrication conversationnelle de l'erreur . . . 468
6.4 Situation #3 : *"- fallait appuyer ?"* . . . 483
6.4.1 Résumé . . . 483
6.4.2 Présentation des incidents critiques . . . 484
6.4.2.1 Présentation de la tâche . . . 484
6.4.2.2 Présentation des réponses escomptées . . . 485
6.4.2.3 Présentation des traces . . . 489
6.4.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 497
6.4.3.1 Schématisation de l'enseignant . . . 497
6.4.3.2 Schématisations des élèves : leurs cheminements . . . 499
6.4.4 Enquête quant à une situation de malentendu pour les trois cheminements . . . 507
6.4.4.1 Première hypothèse : *interactions diverses entre la canne et le plafond* . . 507
6.4.4.2 Énonciation des divergences selon les points de vue . . . 510
6.4.5 Evolution de la situation de malentendu portant sur *diverses interactions entre la canne et le plafond* pour la posture (c) du personnage . . . 512
6.4.5.1 Du point de vue de l'enseignant . . . 512
6.4.5.2 Introduction et traces disponibles . . . 514
6.4.5.3 Moment #1 : la réponse écrite sur le graphe Digalo de Germaine, Ilona et Urs . . . 516
6.4.5.4 Moment #2 : conversation et réponse écrite dans le rapport expérimental de Germaine, Ilona et Urs . . . 516
6.4.5.5 Moment #3 : la réponse écrite sur le graphe Digalo de Annette et Ophélie 516
6.4.5.6 Moment #4 : conversation et réponse écrite dans le rapport expérimental de Annette et Ophélie . . . 517
6.4.5.7 Moment #5 : la réponse écrite sur le graphe Digalo de Alain, Etienne et Pierrette . . . 518
6.4.5.8 Moment #6 : conversation et réponse écrite dans le rapport expérimental de Alain, Etienne et Pierrette . . . 519
6.4.5.9 Moment #7 : aparté entre Barbara, Sylvie et l'enseignant . . . 520

6.4.5.10 Synthèse de l'évolution de la situation de malentendu . . . 523
6.4.6 Discussion . . . 524
6.4.6.1 Commentaire #1 : origine de la tâche et adaptation à la séquence . . . 524
6.4.6.2 Commentaire #2 : vers une sémiologie des consignes scolaires . . . 530
6.4.6.3 Commentaire #3 : réflexion méthodologique et développement de la logique naturelle . . . 532
6.5 Situation #4 : *détente (du ressort)* . . . 535
6.5.1 Résumé . . . 535
6.5.2 Présentation des incidents critiques . . . 536
6.5.2.1 Présentation de la tâche . . . 536
6.5.2.2 Présentation des réponses escomptées . . . 537
6.5.2.3 Présentation des traces . . . 539
6.5.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 546
6.5.3.1 Schématisation de l'enseignant . . . 546
6.5.3.2 Schématisations des élèves : leurs cheminements . . . 550
6.5.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 554
6.5.4.1 Hypothèses . . . 554
6.5.4.2 Énonciation des divergences selon les points de vue . . . 557
6.5.5 Discussion #1 : conception de la consigne et anticipation de la situation de malentendu 559
6.5.6 Discussion #2 : expliquer la difficulté des élèves par la situation de malentendu . . . 561
6.6 Situation #5 : *le poids des mots* . . . 563
6.6.1 Résumé . . . 563
6.6.2 Présentation de l'incident critique . . . 564
6.6.2.1 Présentation de la tâche . . . 564
6.6.2.2 Présentation des réponses escomptées . . . 564
6.6.2.3 Présentation des traces . . . 566
6.6.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 569
6.6.3.1 Schématisation de l'enseignant . . . 569
6.6.3.2 Schématisation des élèves : leurs cheminements en groupe . . . 569
6.6.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 586
6.6.4.1 Travail préparatoire à l'enquête . . . 586
6.6.4.2 Première hypothèse : *le cheminement métacognitif de Barbara est interprété par Aurélie comme un cheminement cognitif* . . . 588
6.6.4.3 Deuxième hypothèse : *des usages de {poids} plus ou moins généraux* versus *particuliers* . . . 590
6.6.4.4 Énonciation des divergences selon les points de vue . . . 591

6.6.4.5 Corollaire aux précédentes hypothèses : deux manières divergentes de "faire de la physique" . . . 592
6.6.5 Évolution de la situation de malentendu *deux manières divergentes de "faire de la physique"* . . . 594
6.7 Situation #6 : *une parodie pour revanche* . . . 597
6.7.1 Résumé . . . 597
6.7.2 Présentation de l'incident critique . . . 598
6.7.2.1 Présentation de la tâche . . . 598
6.7.2.2 Présentation des réponses escomptées . . . 599
6.7.2.3 Présentation des traces . . . 603
6.7.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 608
6.7.3.1 Schématisations des élèves : leur cheminement . . . 608
6.7.3.2 Schématisation de l'enseignant . . . 617
6.7.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 620
6.7.4.1 Première hypothèse : *accord implicite au sujet d'une prétendue erreur* . . . 620
6.7.4.2 Seconde hypothèse : *d'une prétendue erreur à une image dégradée de la discipline scolaire* . . . 622
6.7.4.3 Énonciation des divergences selon les points de vue . . . 624
6.7.5 Discussion . . . 625
6.7.5.1 Commentaire #1 : approche par situation ou par concept . . . 625
6.7.5.2 Commentaire #2 : une tâche conçue par le chercheur . . . 627
6.8 Situation #7 : *attention, une flèche peut en cacher une autre...* . . . 631
6.8.1 Résumé . . . 631
6.8.2 Présentation de l'incident critique . . . 631
6.8.2.1 Présentation de la tâche : le *dessin des forces* . . . 631
6.8.2.2 Présentation des réponses escomptées . . . 633
6.8.2.3 Présentation des traces . . . 635
6.8.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue . . . 637
6.8.3.1 Schématisations de l'enseignant . . . 638
6.8.3.2 Schématisations d'élèves : leurs cheminements . . . 643
6.8.4 Enquête quant à une situation de malentendu . . . 650
6.8.4.1 Introduction . . . 650
6.8.4.2 Première hypothèse (règles d'action) : *des flèches dans tous les sens* . . . 652
6.8.4.3 Deuxième hypothèse (procédure) : *dessiner* versus *dessiner ou pas* . . . 654
6.8.4.4 Troisième hypothèse (panoplie) : *la* vis inertia *de Newton* . . . 657
6.8.4.5 Énonciation des divergences selon les points de vue . . . 661
6.8.5 Discussion . . . 661

6.8.5.1 La situation de malentendu est-elle résolue par les échanges avec l'enseignant ? 661
6.8.5.2 Enjeux didactique du dessin des forces 664
6.8.5.3 Extension de la logique naturelle du discursif à l'illustratif 669

6.1 Introduction

6.1.1 Démarche d'exposition des situations

Avant la présentation et l'analyse des incidents critiques, chaque section débute par un résumé qui met en contexte l'incident critique, sous la forme d'une narration. Le but de ces résumés est d'aider le lecteur à la compréhension de l'incident et de sa scène. Il faut se référer à la suite pour trouver les arguments en faveur des interprétations présentées dans le résumé.

L'analyse contient trois[345] confrontations successives des points de vue des interlocuteurs, mais dans des buts différents. Elles sont énumérées ci-dessous.

1) Une description de l'incident critique ayant attiré l'attention du chercheur :
   - une brève présentation des traces laissées par les interlocuteurs et qui ont conduit à l'identification d'un incident critique dans le corpus ;
   - une description de la situation de l'incident critique et la formulation des questions qu'il soulève.
2) Une reconstruction du cheminement des interlocuteurs selon leur point de vue, établie à partir de la mise en relation de divers éléments de la situation d'interlocution :
   - une confrontation de ces points de vue ;
   - les questions que soulèvent cette confrontation.
3) Une enquête pour énoncer des hypothèses permettant de répondre aux questions soulevées en 2) :
   - la sélection des traces pertinentes[346] sur lesquelles travailler et le mode opératoire de l'enquête afin de tenter de répondre aux questions soulevées ;
   - les résultats de l'enquête et, le cas échéant, la description détaillée des points sur lesquels les interlocuteurs divergent, énoncés à l'aide des opérations de la logique naturelle.

À la suite de l'analyse, des sections de *discussion* permettent d'aborder les enjeux des observations effectuées et leurs implications pour les activités de didactique des sciences. Ces discussions sont organisés par thématiques.

6.1.2 Références aux lois de la physique

Dans l'ensemble du chapitre, je me référerai à quatre lois de la physique de Newton, qui sont utilisées par les élèves et l'enseignant à de multiples reprises. Comme la définition et les noms de ces lois sont

345. S'il n'y en a trois, c'est que toutes les tentatives de présentation plus simples ont échouées.
346. Cette sélection implique une réflexion sur le niveau d'analyse permettant de répondre aux questions soulevées.

susceptibles de varier dans les traces laissées par l'enseignant et les élèves, je vais utiliser le vocabulaire ci-dessous [347] pour faciliter les références à ces objets de discours par la suite.

La loi de la force de gravitation ou "loi classique de la gravitation universelle" dans les cours théoriques du corpus (voir figure B.32, p. 838), permet de déterminer l'intensité de la force d'attraction entre deux masses, tant pour les corps célestes que pour les objets à la surface de la Terre, et s'énonce conventionnellement en langage mathématique par $F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$, où F dénote la force de gravitation exercée par la masse m sur la masse M - ou inversement - éloignée d'une distance r, et où G désigne une valeur constante (environ $6,67 \cdot 10^{-11}$ $\frac{Nm^2}{kg2}$).

La loi de l'inertie ou "première loi de Newton", énonce le principe qui consiste à considérer que "tout corps conserve son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins que des forces n'agissent sur lui et ne le contraignent à changer d'état" (voir figure B.34, p. 864). Elle ne s'énonce pas en langage mathématique.

La loi de la somme des forces ou "deuxième loi de Newton", permet, par exemple, de déterminer l'accélération d'une masse sur laquelle s'exerce(nt) une ou plusieurs force(s) ou, inversement, de déterminer la somme des forces exercées sur un corps en fonction de sa masse et de son accélération. Elle s'énonce en langage mathématique par $\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$, où $\sum \overrightarrow{F}$ dénote la somme des forces qui s'exercent sur la masse m dont a dénote l'accélération au moment considéré.

La loi de la force opposée , ou "troisième loi de Newton", stipule que si une force est exercée par un objet sur un autre, une force d'intensité égale est exercée par le second objet sur le premier dans la même direction et en sens opposé. Elle s'énonce en langage mathématique par $\overrightarrow{F}_{AB} = -\overrightarrow{F}_{BA}$, où $\overrightarrow{F}_{AB}$ dénote le vecteur qui désigne la force exercée par A sur B, et $\overrightarrow{F}_{BA}$ le vecteur qui désigne la force exercée par B sur A.

347. Les intitulés des lois ne sont peut-être pas ceux habituellement utilisés en physique, car le but ici est uniquement de fournir aux lecteurs des termes courts et mnémotechniques qui permettent de rapidement se référer aux objets de discours, c'est-à-dire aux lois dont les définitions *en physique* sont évidemment bien plus complexes que ne le laisseraient entendre les quelques mots fournis ici.

6.2 Situation #1 : *la Lune est en chute libre...*

6.2.1 Résumé

Alors qu'elle travaille à des exercices individuels sur son support de cours théorique, une élève écrit une réponse (correcte) à un exercice en énonçant une égalité qui, elle, n'est pas correcte. L'élève écrit "$g = \frac{F}{M_L} = 9,81\ N/kg$" [348], et la réponse attendue est bien "$g = 9,81$", mais $\frac{F}{M_L}$ n'est pas égal à g, ni à $9,81$. Comment cette élève parvient-elle à écrire cette réponse ?

L'analyse du cheminement de l'élève lors de la résolution de ces exercices permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu. La divergence entre le point de vue de l'élève et celui de l'enseignant porte sur la relation entre le premier et le second exercice d'une même page du cours théorique. L'analyse révèle l'importance de la mise en page des exercices dans cette situation de malentendu. La feuille d'exercices (voir Figure 6.1, p. 384) présente en haut de la page des savoirs théoriques au sujet de la loi de gravitation universelle en astronomie, puis invite les élèves à effectuer deux exercices dans la partie inférieure de la page. Les consignes des exercices sont placées sous le titre "Applications", sous la forme de deux questions sur deux lignes qui se suivent. En-dessous des questions, les élèves sont invités à compléter une série de valeurs (distance Terre-Lune, rayon de la Terre, etc.) avant d'écrire les réponses aux deux questions dans un espace ligné spécialement conçu à cet effet.

Le premier exercice invite à calculer la force d'attraction entre la Terre et la Lune à partir de la loi de la force de gravitation (énoncée en langage mathématique en haut de la feuille d'exercices), des valeurs de la masse de la Terre, du rayon de la Terre, de la masse de la Lune, du rayon de la Lune et de la distance qui sépare la Terre de la Lune. Le second exercice invite les élèves à calculer la valeur de "g", c'est-à-dire l'accélération des objets en chute libre à la surface de la Terre, à partir de la loi de la force de gravitation, de la loi de la somme des forces et du rayon de la Terre.

Du point de vue de l'enseignant, le premier exercice est une "application" de la loi de gravitation universelle en astronomie, alors que le second est "application" de la loi de la force de gravitation en balistique. Les deux exercices ont été conçus comme fonctionnant indépendamment l'un de l'autre, si ce n'est qu'il est attendu pour les deux exercices que l'élève utilise la formulation mathématique de la loi de la force de gravitation ($F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$). Pour l'enseignant, le point commun entre les deux exercices consiste à faire usage de la loi de la force de gravitation, mais cet usage n'est pas le même dans les deux cas.

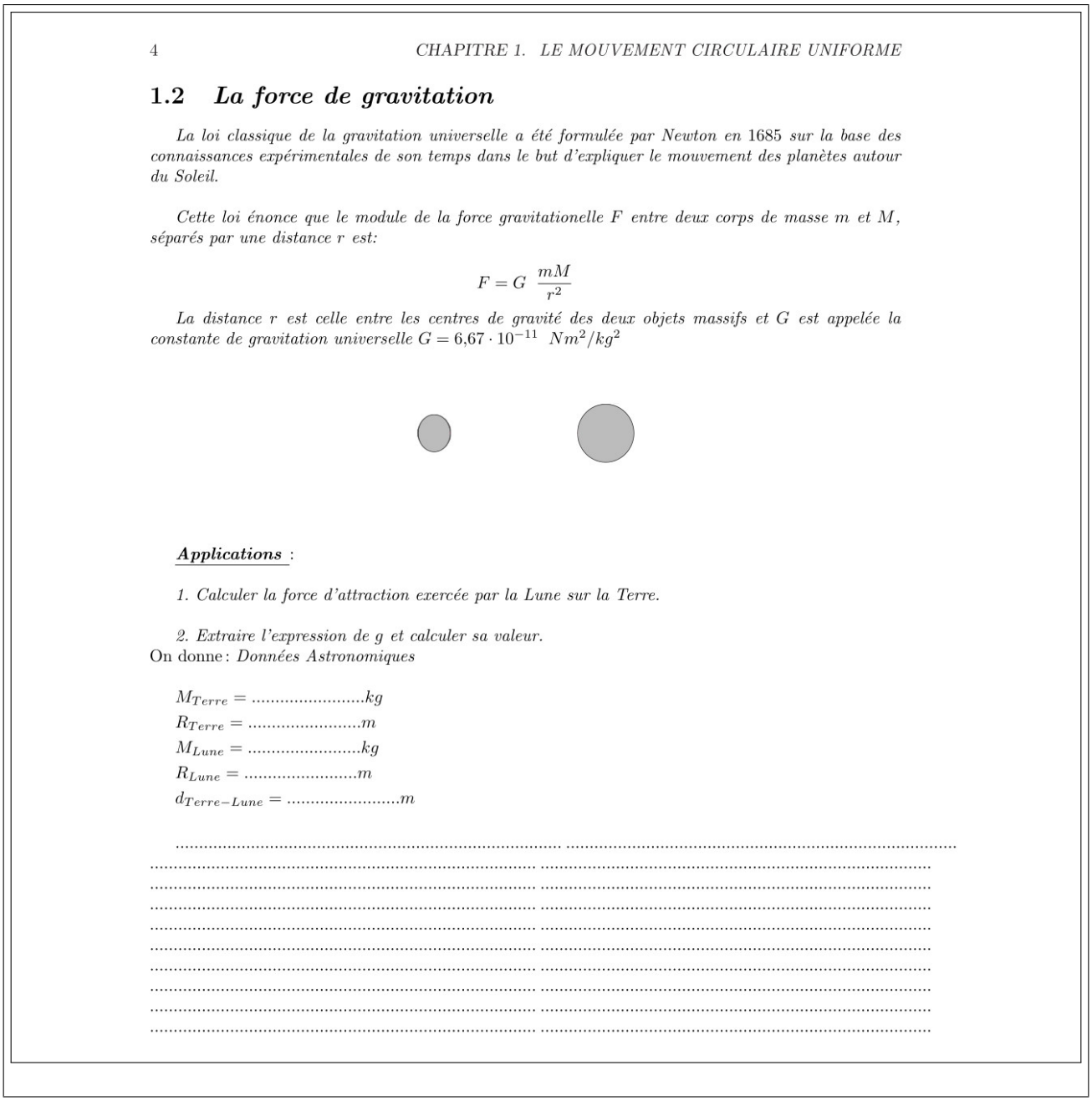
Du point de vue de l'élève, cette idée d'une "application" d'une loi est interprétée de manière plus scolaire. Elle répond au second exercice comme si les deux questions constituaient un seul et même calcul en deux étapes. En conséquence, elle essaye de calculer "g" à partir de la force d'attraction entre la Terre et la Lune, en traitant implicitement la Lune comme l'objet en chute libre dont "g" est l'accélération. Autrement dit, elle tente de calculer "g" à partir de la chute de la Lune sur la Terre. Si le raisonnement est intéressant, il n'est cependant pas pertinent pour les objectifs d'apprentissage de l'enseignant, centrés

348. Pour les traces complètes, se référer à la figure 6.4, page 388.

sur l'accélération constante d'un corps "en chute libre" *à la surface de* la Terre : en effet, même si la Lune peut être considérée "en chute libre", l'intensité de l'accélération résultant de l'exercice de la force de gravitation par la Terre n'est plus du tout la même à la distance Terre-Lune. De fait, la Lune "tombe" sur la Terre sans jamais l'atteindre, décrivant plutôt une orbite autour de la Terre. Ce n'est qu'à la surface de la Terre que cette accélération est plus ou moins constante pour les corps en chute libre, ce qui lui vaut d'être nommée par une lettre : "g".

6.2.2 Présentation de l'incident critique

6.2.2.1 Présentation de la tâche



4 CHAPITRE 1. LE MOUVEMENT CIRCULAIRE UNIFORME

1.2 *La force de gravitation*

La loi classique de la gravitation universelle a été formulée par Newton en 1685 *sur la base des connaissances expérimentales de son temps dans le but d'expliquer le mouvement des planètes autour du Soleil.*

Cette loi énonce que le module de la force gravitationelle F entre deux corps de masse m et M, séparés par une distance r est:

$$F = G\ \frac{mM}{r^2}$$

La distance r est celle entre les centres de gravité des deux objets massifs et G est appelée la constante de gravitation universelle $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \ Nm^2/kg^2$

Applications :

1. *Calculer la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre.*

2. *Extraire l'expression de g et calculer sa valeur.*

On donne : *Données Astronomiques*

M_{Terre} = ...kg
R_{Terre} = ...m
M_{Lune} = ...kg
R_{Lune} = ...m
$d_{Terre-Lune}$ = ...m

FIGURE 6.1 – Feuille d'exercices sur la force de gravitation.

L'incident critique concerne une feuille d'exercices que l'enseignant a reprise d'un polycopié utilisé par des collègues et distribué aux élèves lors des cours théoriques. Les élèves ont complété cette feuille individuellement, en cours et en devoir à domicile. Ces exercices font partie des pratiques habituelles de l'établissement [349]. La consigne est présentée dans la figure 6.1 (p. 384), à laquelle je me référerai par la suite par l'expression *feuille d'exercices sur la force de gravitation*.

La feuille d'exercices sur la force de gravitation est donc issue d'un polycopié de cours. Elle se trouve dans le chapitre intitulé "le mouvement circulaire uniforme", dans lequel se trouvent parfois des exercices à compléter, comme c'est le cas ici. Cette feuille comporte deux parties principales (voir figure 6.2 [350], p. 386). La partie supérieure présente quelques explications théoriques qui introduisent la loi de la force de gravitation. La partie inférieure de la feuille présente deux exercices, les exercices "1" et "2", sous le titre "Applications". Je reproduis ci-dessous les questions de ces deux exercices :

Extrait de la consigne des exercices 1 et 2 - cours théorique MCU - Figure B.32

```
1. Calculer la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre.
2. Extraire l'expression de g et calculer sa valeur.
```

L'exercice 1 demande la valeur numérique de la force exercée par la Lune sur la Terre, que l'élève peut calculer à l'aide du discours d'enseignement fourni en haut de la feuille, en utilisant la loi de la force de gravitation. L'exercice 2 demande la valeur numérique de l'accélération des objets en chute libre [351], en partant aussi de la loi de la force de gravitation.

6.2.2.2 Présentation des réponses escomptées

L'intention de ces exercices est de partir de la loi de la force de gravitation [352] pour en déduire *à la fois* la force d'attraction entre deux corps célestes *et* l'accélération (plus ou moins) constante des objets en chute libre à la surface de la Terre [353].

La figure 6.3 (p. 387) présente les réponses escomptées par l'enseignant et permettant de réussir la tâche de son point de vue. Les réponses présentées dans la figure 6.3 ont néanmoins été exceptionnellement

349. Notons que cette pratique n'explicite ni n'exige des élèves le travail de définition d'un système d'interaction avant les calculs, comme l'ont proposé Tiberghien et Weil-Barais (1987). De nombreux travaux ont été réalisés par les mêmes auteurs et leurs équipes depuis, parmi lesquels l'étude de Tiberghien et Malkoun (2007) est particulièrement intéressante du fait de la comparaison détaillée des apprentissages effectués par les élèves lors d'une pratique plus traditionnelle par rapport à la pratique faisant usage du "modèle des interactions", notamment.

350. Les lignes se terminant par des points ont une fonction déictique, de pointage. Je réserve l'usage des flèches pour d'autres fonctions sémiotiques, p.ex. pour représenter la transformation effectuée par les opérations logico-discursives.

351. Certains lecteurs se demandent peut-être d'où vient la lettre "g" dans les questions : c'est une abréviation pour l'accélération des objets en chute libre que les élèves ont étudiée l'année scolaire précédente (voir figure B.31 (p. 831). J'y reviens par la suite dans l'analyse.

352. Cette loi est nommée sur la feuille d'exercices "loi classique de la gravitation universelle" de Newton, et c'est uniquement la lettre majuscule "F" qui évoque le fait qu'il s'agit d'une *force*.

353. Le fait de trouver un tel double objectif est probablement lié à des raisons historiques : il s'agit de montrer le génie de la physique de Newton, qui avait justement impressionné les scientifiques de son époque parce que sa théorie permettait d'avoir une même loi pour le monde supra-lunaire et le monde sub-lunaire (Koyré, 1968), comme on les dénommait alors. L'exercice 1 fait un usage "supra-lunaire" de la loi classique de gravitation universelle, alors que l'exercice 2 en fait un usage "sub-lunaire", permettant de montrer que la constante "g" n'est qu'un cas particulier tiré d'une loi plus générale.

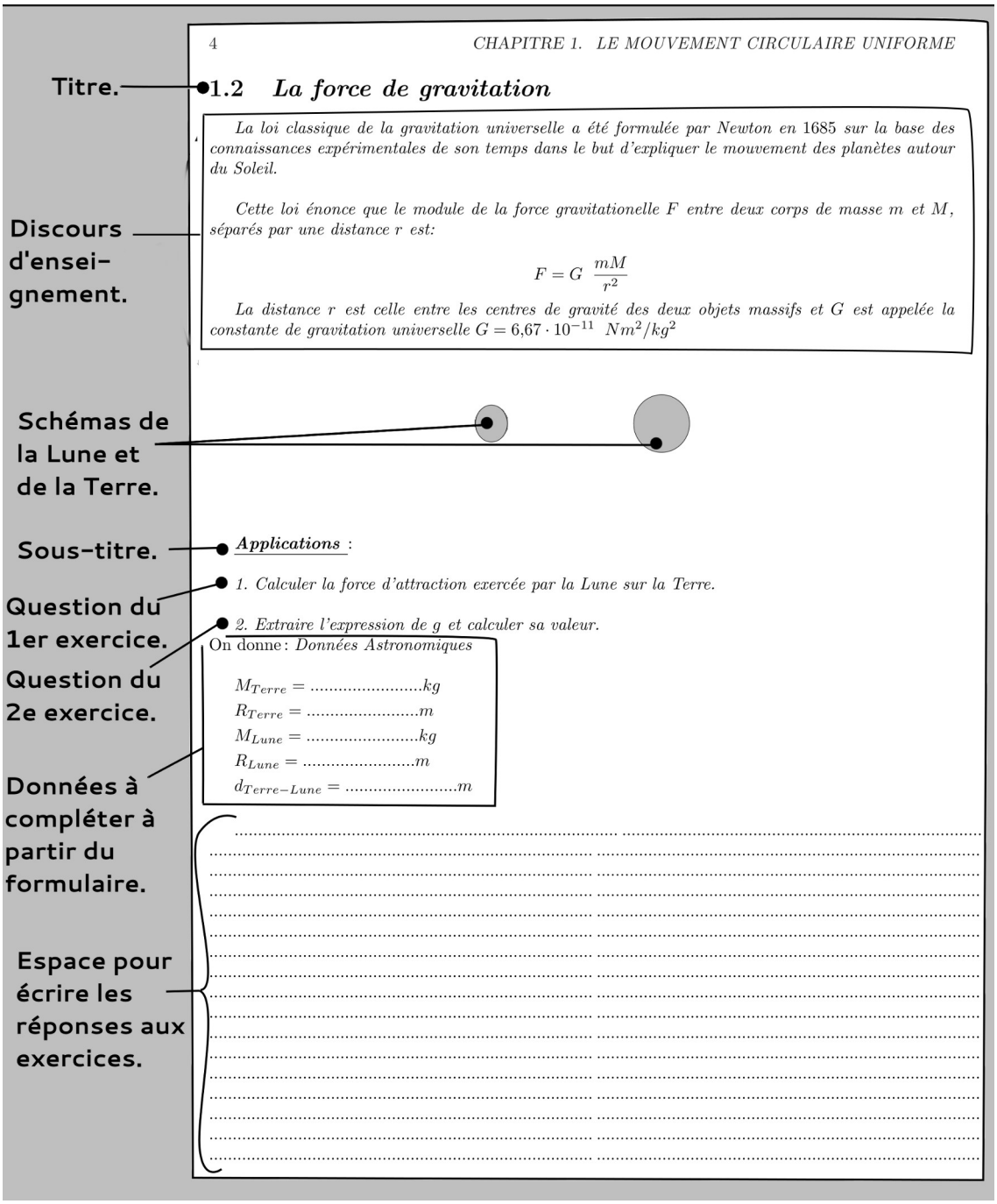
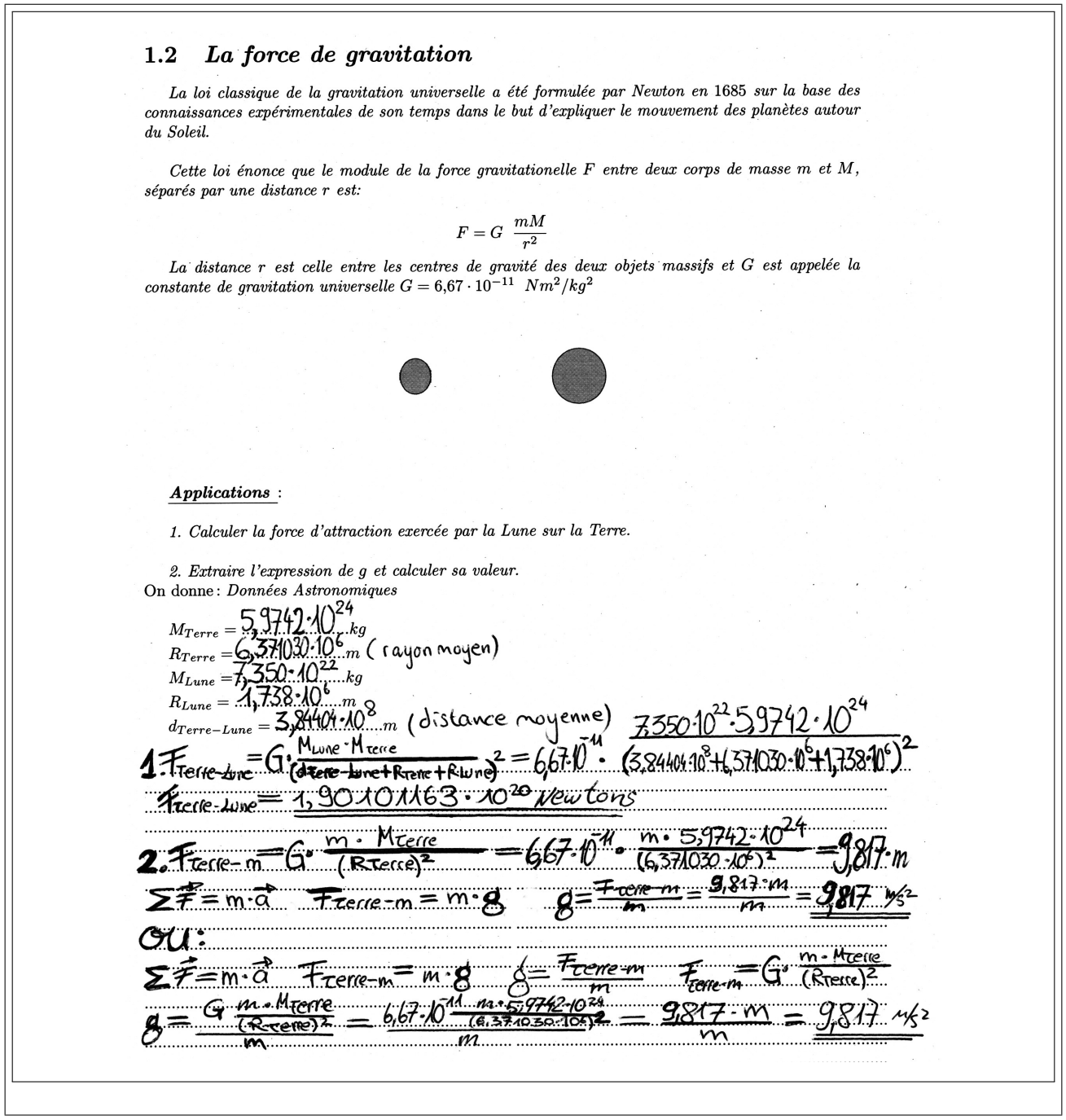


FIGURE 6.2 – Commentaires de la feuille d'exercices sur la force de gravitation.

rédigées par le chercheur à partir de son enquête, l'enseignant en charge de la classe n'ayant pas fourni de version corrigée de la feuille d'exercices. La présentation des réponses escomptées sert uniquement à l'identification d'un incident critique, à cette étape de l'enquête[354]. Elle nous permet de disposer d'un

354. La pratique d'écriture mathématique présentée dans la figure 6.3 ne prétend donc pas constituer une norme, un modèle à suivre, mais s'approche plutôt d'une imitation des usages rencontrés dans cet établissement scolaire. En ce sens, la réponse du chercheur fournit un exemple d'une écriture qui serait considérée comme acceptable dans ce milieu. Il est ainsi tout à fait possible que la pratique d'écriture de la lectrice ou du lecteur divergent à certains égards. Les implications de ces divergences ne sont pas discutées ici, quand bien même elles mériteraient certainement un travail de recherche approfondi.



1.2 *La force de gravitation*

La loi classique de la gravitation universelle a été formulée par Newton en 1685 sur la base des connaissances expérimentales de son temps dans le but d'expliquer le mouvement des planètes autour du Soleil.

Cette loi énonce que le module de la force gravitationelle F entre deux corps de masse m et M, séparés par une distance r est:

$$F = G\ \frac{mM}{r^2}$$

La distance r est celle entre les centres de gravité des deux objets massifs et G est appelée la constante de gravitation universelle $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ Nm^2/kg^2$

Applications :

1. *Calculer la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre.*

2. *Extraire l'expression de g et calculer sa valeur.*

On donne : *Données Astronomiques*

$M_{Terre} = 5,9742 \cdot 10^{24}\ kg$
$R_{Terre} = 6,371030 \cdot 10^{6}\ m$ (rayon moyen)
$M_{Lune} = 7,350 \cdot 10^{22}\ kg$
$R_{Lune} = 1,738 \cdot 10^{6}\ m$
$d_{Terre-Lune} = 3,84404 \cdot 10^{8}\ m$ (distance moyenne)

1. $F_{Terre-Lune} = G \cdot \frac{M_{Lune} \cdot M_{Terre}}{(d_{Terre-Lune} + R_{Terre} + R_{Lune})^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{7,350 \cdot 10^{22} \cdot 5,9742 \cdot 10^{24}}{(3,84404 \cdot 10^{8} + 6,371030 \cdot 10^{6} + 1,738 \cdot 10^{6})^2}$

$F_{Terre-Lune} = 1,90101163 \cdot 10^{20}$ Newtons

2. $F_{Terre-m} = G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{(R_{Terre})^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{m \cdot 5,9742 \cdot 10^{24}}{(6,371030 \cdot 10^{6})^2} = 9{,}817 \cdot m$

$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ $F_{Terre-m} = m \cdot g$ $g = \frac{F_{Terre-m}}{m} = \frac{9,817 \cdot m}{m} = 9{,}817\ m/s^2$

OU :

$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ $F_{Terre-m} = m \cdot g$ $g = \frac{F_{Terre-m}}{m}$ $F_{Terre-m} = G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{(R_{Terre})^2}$

$g = \frac{G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{(R_{Terre})^2}}{m} = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{m \cdot 5,9742 \cdot 10^{24}}{(6,371030 \cdot 10^{6})^2}}{m} = \frac{9{,}817 \cdot m}{m} = 9{,}817\ m/s^2$

FIGURE 6.3 – Feuille d'exercices sur la force de gravitation complétée par le chercheur.

point de vue de référence lors de l'examen des traces laissées par l'élève. À cette fin, la solution à l'exercice 2 comprend deux variantes (séparée par "ou :" sur la feuille), qui correspondent aux deux ordres possibles dans la procédure : commencer par la loi de la force de gravitation et utiliser ensuite la loi de la somme des forces, ou inversement commencer par la loi de la somme des forces et utiliser ensuite la loi de la force de gravitation. Nous reviendrons sur les détails des réponses escomptées au moment de discuter les traces laissées par l'élève.

6.2.2.3 Présentation des traces laissées par l'élève

L'incident critique concerne la réponse d'une élève (Pauline, 17 ans), considérée par l'enseignant comme "une bonne élève". L'enseignant a transmis au chercheur une copie du polycopié de cours complété par Pauline, dans le but de lui fournir un exemplaire d'un cours théorique bien complété. Les traces laissées sur la feuille par l'élève sont reproduites dans leur intégralité sur la figure 6.4, p. 388.

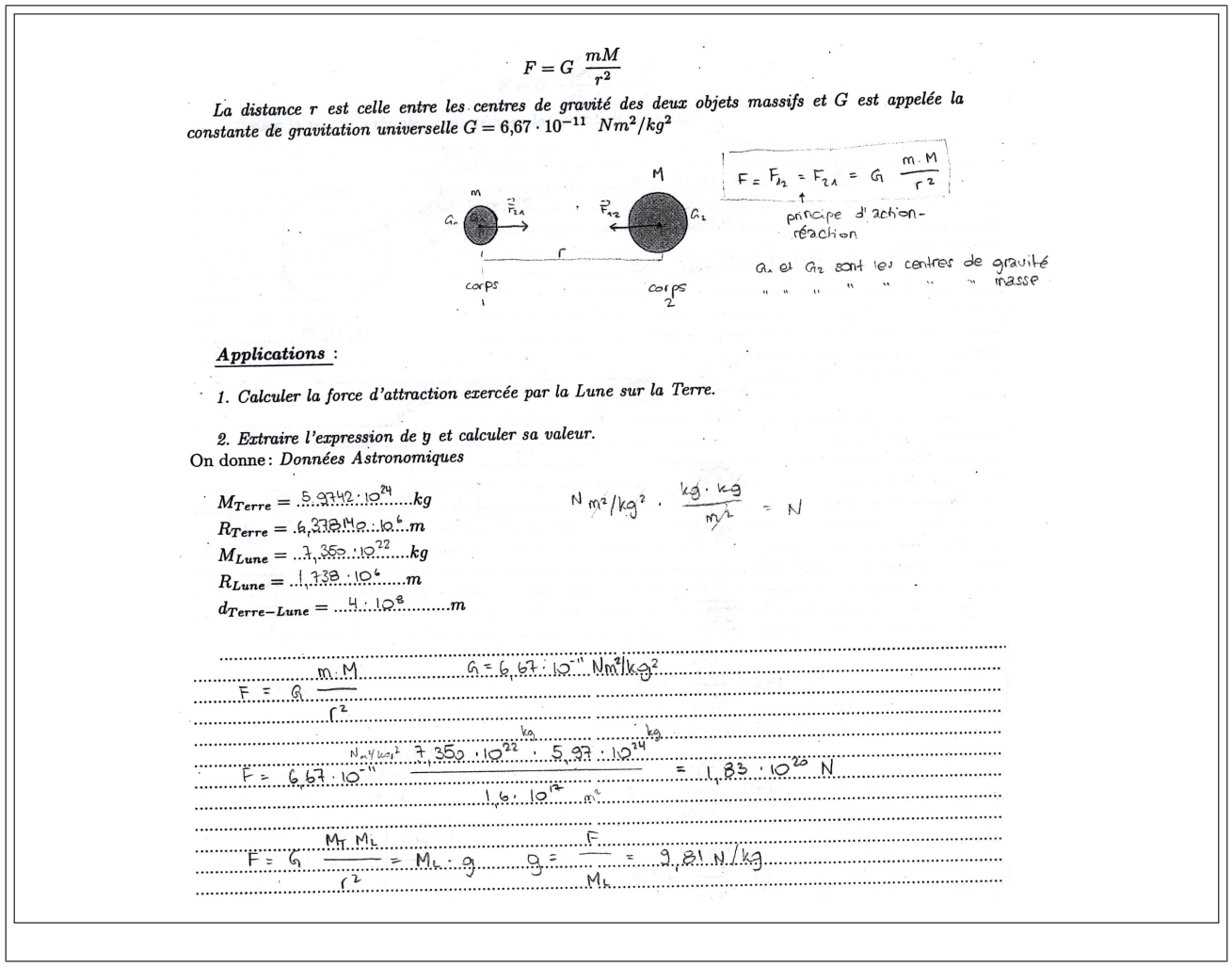


FIGURE 6.4 – Feuille d'exercices sur la force de gravitation complétée par Pauline.

Pauline répond aux exercice 1 et 2 directement sur la feuille. Elle utilise à cet effet la zone pour écrire dans la partie inférieure de la feuille, complète les données astronomiques comme attendu, mais dessine et écrit également sur la partie supérieure de la feuille. La figure 6.5 (p. 389) désigne les diverses parties de la réponse rédigée par Pauline et l'exercice auquel se réfère chacune de ces parties.

Dans sa réponse à l'exercice 1, Pauline utilise les deux schémas des planètes pour y représenter des vecteurs par des flèches, selon la pratique usuelle de cette classe[355]. A droite de ces schémas, elle écrit

355. Pour une discussion de cette pratique scolaire, se référer à la situation #7, page 631 et suivantes.

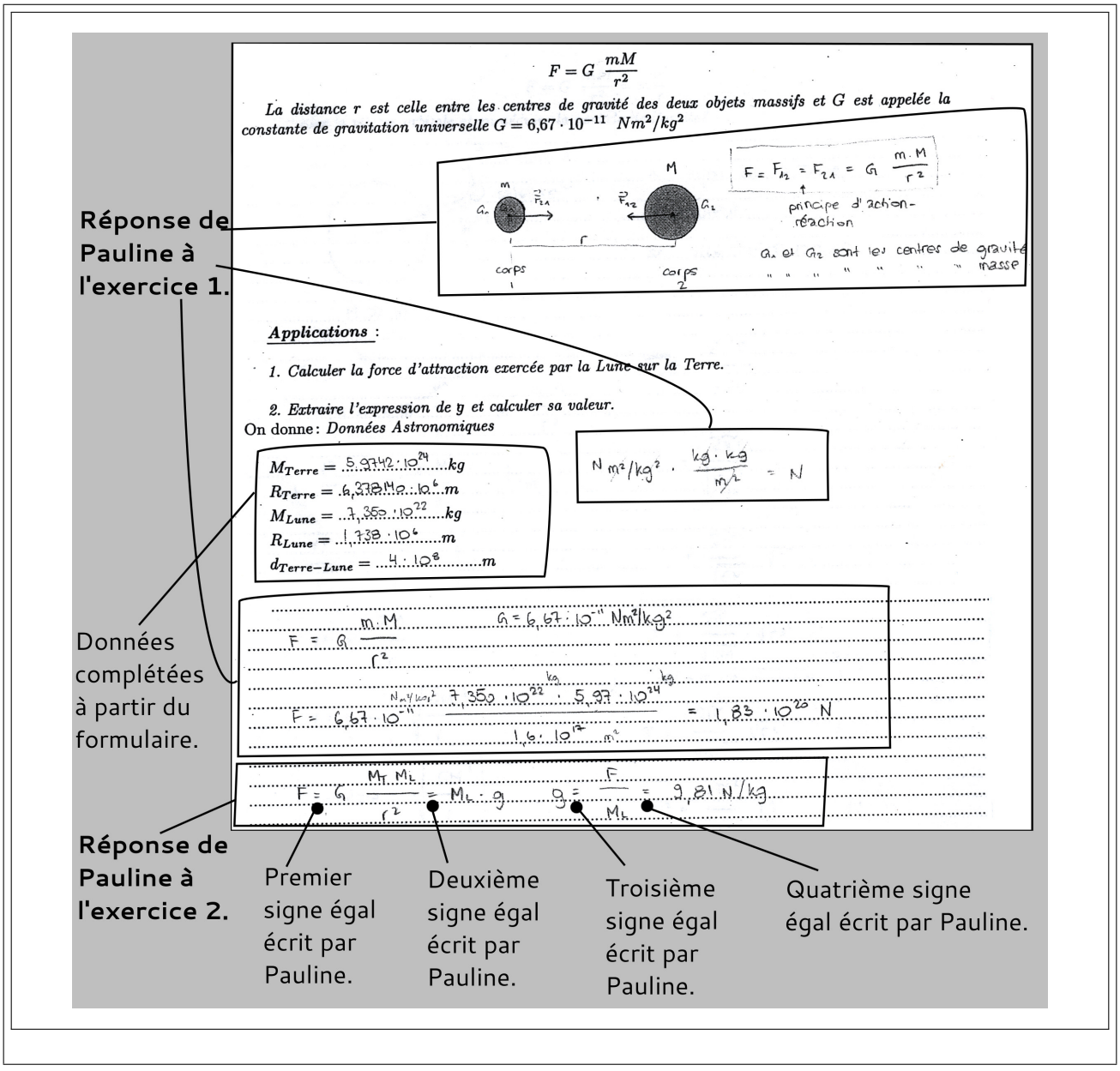


FIGURE 6.5 – Commentaires de la feuille d'exercices sur la force de gravitation complétée par Pauline.

l'équation suivante (équation 6.1) :

$$F = F_{12} = F_{21} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \tag{6.1}$$

Pauline rédige cette équation en commençant par F, qui fait référence à la force de gravitation *en général*, puis se poursuit avec l'écriture de l'égalité entre F et F_{12} [356], qui dénote la force de gravitation exercée par la Lune sur la Terre selon les indications fournies sur le schéma. Ensuite, Pauline établit l'égalité entre la force de gravitation exercée par la Lune sur la Terre et la force de gravitation exercée par la Terre

356. L'indice se lit comme une direction, "exercé par 1 sur 2", et non comme un "douze", les chiffres faisant référence aux indices donnés aux corps célestes, le corps "1" correspond à la Lune puisqu'il est plus petit, et le corps "2" à la Terre, le corps plus grand. "F_{12}" représente donc la force d'attraction exercée par la Lune (le corps 1) sur la Terre (le corps 2).

sur la Lune à partir de sa connaissance de la loi de la force opposée, en écrivant "$F_{12} = F_{21}$". Finalement, Pauline appose[357] à l'égalité entre ces deux forces le produit défini par la loi de gravitation universelle ($\frac{G \cdot m \cdot M}{r^2}$), où m et M sont les deux masses séparées par une distance r, et G est une constante, de valeur G=6.67 $\cdot$ 10^{-11} $\frac{Nm^2}{kg^2}$[358].

Pour répondre à la question de l'exercice 1, Pauline calcule ensuite la valeur de la force exercée par la Lune sur la Terre (F_{12}) à partir de l'équation qu'elle a rédigée dans la partie supérieure de la feuille. Pour réussir cette étape, elle complète les données astronomiques sur la partie médiane de la feuille à partir d'un ouvrage de référence, le *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985) :

- masse de la Terre : 5.9742 $\cdot$ 10^{24} *kg* ;
- rayon de la Terre : 6.378140 $\cdot$ 10^{6} *m* ;
- masse de la Lune : 7.350 $\cdot$ 10^{22} *kg* ;
- rayon de la Lune : 1.738 $\cdot$ 10^{6} *m* ;
- distance Terre-Lune : 4 $\cdot$ 10^{8} *m*.

En remplaçant les variables m et M de la loi de la gravitation respectivement par la masse de la Terre et la masse de la Lune, et la variable r de la loi de la gravitation générale par la distance Terre-Lune, Pauline obtient la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre. Je reproduis ci-dessous l'équation utilisée par Pauline, en développant à l'aide des valeurs fournies par le *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985), dans l'équation 6.2 ci-dessous :

$$\begin{aligned} F &= G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \\ F &= 6.67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5.9742 \cdot 10^{24} \cdot 7.350 \cdot 10^{22}}{(4 \cdot 10^{8})^2} \\ F &= 1.8305 \cdot 10^{20} N \end{aligned} \tag{6.2}$$

Concernant ce premier exercice, je n'ai pas trouvé d'incident critique : la démarche et les valeurs utilisées par Pauline correspondent aux attentes scolaires : Pauline écrit sur sa feuille d'exercice le résultat de "$1,8305 \cdot 10^{20} Newtons$", identique au résultat du cheminement reconstruit ci-dessus.

357. J'utilise ici précisément le verbe *apposer* pour désigner l'action de l'élève, lors de son écriture, qui consiste à poser à la suite de l'expression mathématique précédente le signe "=" suivi d'une expression accommodée de la loi de la gravitation alors que l'expression mathématique précédente ne faisait qu'exprimer la loi de la force opposée. Pauline aurait dû, en toute rigueur, recommencer sur une nouvelle ligne au moment de prendre la loi de la force de gravitation pour établir F. Néanmoins, cet usage en "apposition" est non seulement toléré dans l'établissement scolaire en classe de physique, mais également pratiqué par l'enseignant lui-même. Pour notre analyse, il suffit de prendre conscience que les signes "=" ne jouent pas tous le même rôle sémiotique dans cette pratique de l'apposition : le deuxième signe "=" (dans "$F_{12} = F_{21}$") a pour rôle l'application de la loi de la force opposée à la forces exercée par la Lune sur la Terre (Pauline va d'ailleurs jusqu'à préciser le sens du signe "=" de l'expression en y ajoutant une légende : "principe d'action-réaction"), alors que le troisième signe "=" (dans "$F_{21} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$") a pour rôle de définir l'intensité de la force exercée à partir de la loi de la force de gravitation.

358. Les lettres d'abréviation des unités de mesure sont écrites en italique : dans l'expression ci-dessus, *N* signifie Newton, *m* mètre et *kg* kilogramme.

Dans la réponse de Pauline au deuxième exercice, par contre, une anomalie apparaît : la réponse numérique ($g = 9,81 \frac{m}{s^2}$) correspond à celle attendue, mais le quatrième signe "=" écrit par Pauline pour cette réponse (voir figure 6.5, p. 389) est erroné. Comment Pauline en est-elle arrivée à produire cette erreur ?

Pour répondre à cette question, il s'agit à présent de reconstruire le cheminement de Pauline lors de la schématisation [359]. Avant cela, je vais néanmoins présenter la réponse attendue à l'exercice 2, du point de vue de l'enseignant, de manière à ce que les décisions prises par Pauline puissent être situées par rapport à ces attentes.

6.2.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue

6.2.3.1 Schématisation de l'enseignant

L'enseignant [360] s'attendrait à ce que les élèves utilisent, pour résoudre l'exercice 2, la loi de la force de gravitation de manière à déterminer la force exercée par la Terre sur un objet, d'une part, et la loi de la somme des forces pour calculer l'accélération "g" à partir de la valeur de cette force, d'autre part. La construction de cette solution pourrait suivre l'un ou l'autre des deux cheminements suivants, selon que l'on commence par la loi de la force de gravitation (cheminement A) ou par la loi de la somme des forces (cheminement B). Ces deux cheminements sont présentés en détail ci-dessous, et correspondent aux deux variantes présentées dans la figure 6.3 (p. 387) de manière plus sommaire.

Cheminement A

1. La lettre "g" désigne l'accélération des objets attirés par la Terre au voisinage d'icelle (voir figure 6.1, p. 384), c'est-à-dire l'accélération résultant de l'exercice de la force de gravitation par la Terre sur n'importe quel objet se trouvant à une distance du centre de gravité de la Terre approximativement égale au rayon de la Terre. Une démarche possible consiste donc à commencer par déterminer cette

359. Utilisé strictement au sens de Grize (1996), *schématisation* fait référence ici à la "représentation logico-discursive" (p. 50) que constituent les traces écrites de la réponse de Pauline, non seulement en tant qu'expressions langagières mais également en tant qu'expressions sémiotiques et organisées - selon une logique naturelle spécifique à la situation et à la locutrice - qui fournissent des indices du processus de raisonnement à l'origine des écritures de Pauline. En effet, comme le souligne entre autres Grize (1996), si les traces logico-discursives ne peuvent légitimement être considérées comme la photographie du processus de pensée de la locutrice, il y a néanmoins un raisonnement de la locutrice lors du processus de schématisation, dont les traces écrites fournissent quelques indices permettant une reconstruction par le chercheur de son cheminement de pensée ayant conduit à la production de sa réponse, que nous pouvons tenter de décrire.

360. Il s'agit d'une reconstruction des attentes par le chercheur, à partir des procédures et opérations nécessaires à la réussite scolaire de la tâche : les réflexions des enseignants impliqués dans cette séquence ne sauraient être réduites à celles retracées dans ces lignes. Au contraire, j'ai été témoin en salle des maîtres de réflexions remettant en question les attentes habituelles, réflexions qui ne sont pas forcément dites aux élèves mais qui représenteraient mieux l'opinion des enseignants que les attentes reconstruites ici uniquement dans le but de formuler les conditions de réussite de la tâche. En outre, les attentes que je formule ici ne constituent pas non plus mon point de vue sur la physique, ni un jugement de (non-)pertinence de ces propos, et je ne présume pas non plus que tous les enseignants s'attendent à ce que les élèves effectuent cette tâche de cette manière, ni à ce que les physiciens pensent que c'est la (seule) réponse à la question posée. Au fond, ces attentes sont reconstruites ici uniquement dans le but de donner à comprendre aux lecteurs les divergences entre le cheminement "normal" pour réussir la tâche réussie dans la situation étudiée, et le cheminement de Pauline présenté plus loin. Pour toutes ces raisons, j'utilise ici le conditionnel dans ma reconstruction des attentes.

force de gravitation exercée par la Terre sur un objet de masse m, que j'écrirai "$F_{Terre-m}$". La loi de la force de gravitation peut être utilisée pour déterminer cette force, mais elle implique deux masses ("M" et "m") dont un seul est connu par la question de l'exercice 2, à savoir la masse de la Terre. L'autre masse, m, reste une variable dans cet exercice puisqu'il s'agit de calculer la force de gravitation exercée par la Terre sur *un objet quelconque*, un objet de masse m. Nous pouvons déjà écrire : $F_{Terre-m} = G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{r^2}$.

2. La deuxième question qui se pose concerne la variable r dans la loi de la force de gravitation : quelle distance faut-il choisir ?[361]. La distance entre le centre de gravité de la Terre et un objet en chute libre est variable, d'autant plus que cet objet est en train de tomber. Mais si nous faisons le choix de garder r sous forme de variable, nous obtenons une fonction à deux variables qui ne permet pas d'en tirer une équation à une seule inconnue, de manière à permettre la résolution algébrique coutumière des élèves. Une simplification du modèle est nécessaire pour pouvoir effectuer l'exercice : le problème peut être simplifié en considérant que les objets en chute libre dont il est question se trouvent tous *plus ou moins* à la surface de la Terre, c'est-à-dire à une distance du centre de gravité de la Terre qui équivaut au rayon (moyen) de la Terre. Cette simplification du modèle permet de remplacer la variable r de la loi de la force de gravitation par une valeur, le rayon (moyen) de la Terre. Nous pouvons désormais écrire : $F_{Terre-m} = G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{R^2_{Terre}}$.

3. Les deux étapes précédentes permettent de déterminer approximativement la force de gravitation exercée par la Terre sur n'importe quel objet de masse m situé à sa surface :
$F_{Terre-m} = G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{R^2_{Terre}} = \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \cdot m \cdot 5.9742 \cdot 10^{24}}{(6.37814 \cdot 10^6)^2} = 9.795 \cdot m.$

4. Il s'agit à présent de déterminer l'accélération résultant de cette force, ce que nous permet de faire la loi de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$), puisqu'elle définit l'accélération de l'objet de masse m à partir de la somme des forces exercées sur cet objet. Pour utiliser la loi de la somme des forces, il faut réfléchir aux forces qui s'exercent sur l'objet, à leur direction et à leur sens[362]. L'enseignant choisirait probablement une seule force exercée sur l'objet quelconque en chute libre à la surface de la Terre, à savoir la force de gravitation exercée par la Terre ($F_{Terre-m}$). Cela permet de poser l'équation $F_{Terre-m} = m \cdot g$ qui permet d'extraire la valeur de g : $g = \frac{F_{Terre-m}}{m} = \frac{9.795 \cdot m}{m} = 9.795.$

361. Dans le modèle de physique classique, la force de gravitation exercée par la Terre sur l'objet en chute libre s'exerce à partir d'une localisation que le modèle désigne comme un point mathématique situé en son centre de gravité. De même, l'objet en chute libre est localisé en un point, situé à son centre de gravité. En conséquence, l'accélération des objets en chute libre n'est constante que relativement à une certaine altitude (ou distance au centre de gravité de la Terre). Pour une distance r commune à n'importe quel objet en chute libre, une solution simple consiste donc à choisir le rayon de la Terre, en précisant alors que "g" est l'accélération d'un objet en chute libre *à la surface de la Terre*. Néanmoins, ce modèle est une simplification des phénomènes permettant de présenter l'accélération due à la pesanteur "g" comme une constante : ce que les physiciens du $XVII^{ème}$ ont découvert *après* coup, c'est que cette accélération ne dépend pas seulement de l'altitude - ce que la loi de la force de gravitation prend en considération - mais aussi de la latitude à laquelle se trouve l'objet en chute libre (Deparis, 2013) : les effets de la latitude sur la pesanteur s'expliqueraient notamment en raison du mouvement de rotation de la Terre - la (pseudo-)force centrifuge ayant un effet sur la force de gravitation - et, de l'avis de Newton et contre Huygens à l'époque, en raison de la forme non sphérique de la Terre qui rendrait irrégulier la force de gravitation qu'elle exerce sur des objets à sa surface. Finalement, "g" n'est qu'approximativement constante à la surface de la Terre.

362. En effet, la flèche surlignant le F désignant une force exercée sur l'objet et le a désignant l'accélération font référence à des vecteurs disposant d'une intensité, d'une direction et d'un sens. Or, la somme ($\sum$) doit tenir compte des rapports géométriques entre les directions et les sens des vecteurs en présence avant de pouvoir déterminer la somme des intensités de ces mêmes forces.

5. La dernière étape consiste éventuellement à spécifier l'unité de mesure de g : l'unité de mesure de la force, le *Newton*, étant par définition le produit d'une masse ($kilogramme$) et d'une accélération ($mètre\ par\ seconde\ au\ carré$), on peut déterminer que l'unité de mesure pour g, dans la procédure énoncée ci-dessus, est l'unité de mesure de l'accélération, puisque la force ($F_{Terre-m}$) est divisée par une masse (m) pour déterminer la valeur de g ; g vaut donc 9,795$\frac{m}{s^2}$.

Cheminement B

1. L'autre démarche possible consiste à partir de la loi de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$), en remplaçant l'accélération a par la valeur g recherchée ($\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{g}$), et la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F}$) par la force exercée par la Terre sur la masse m ($\overrightarrow{F_{Terre-m}} = m \cdot \overrightarrow{g}$). En considérant que la force de gravitation exercée par la Terre sur l'objet va dans la même direction et le même sens que l'accélération g[363], l'enseignant pourrait faire passer "g" à gauche de l'équation[364], et poser l'égalité suivante : $g = \frac{F_{Terre-m}}{m}$.
2. La deuxième étape de cette solution consiste à remplacer $F_{Terre-m}$ dans $g = \frac{F_{Terre-m}}{m}$ par une expression plus détaillée obtenue à partir de la loi de la force de gravitation. Cette étape nécessite de poser $F_{Terre-m} = G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{R^2_{Terre}}$ en prenant les décisions détaillées aux étapes 1 et 2 du cheminement A pour les variables m et r.
3. Une fois l'expression détaillée de $F_{Terre-m}$ obtenue, elle peut être placée dans $g = \frac{F_{Terre-m}}{m}$ pour écrire : $g = \frac{G \cdot \frac{m \cdot M_{Terre}}{R^2_{Terre}}}{m}$.
4. À partir de l'expression ci-dessus, il suffit de remplacer les variables définies par des "données astronomiques" par les valeurs correspondantes pour obtenir la réponse à l'exercice 2 : $g = \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 5.9742 \cdot 10^{24}}{(6.37814 \cdot 10^6)^2} = 9.795.$
5. La dernière étape consiste éventuellement à spécifier l'unité de mesure de g, comme pour le cheminement A, en divisant l'unité de mesure de la force, le *Newton*, par l'unité de mesure de la masse, le *kilogramme*, de manière à obtenir l'unité de mesure de l'accélération g, le *mètre par seconde au carré* : g=9,795$\frac{m}{s^2}$.

Le résultat montre une légère variation par rapport à la valeur de 9,81$\frac{m}{s^2}$ utilisée dans cette classe[365]. Or, Pauline écrit 9,81$\frac{m}{s^2}$ dans sa réponse à l'exercice 2, ce qui fournit un indice supplémentaire en faveur

363. Ce n'est pas tout à fait vrai, puisque Hooke, en 1679, affirme que l'accélération des objets en chute libre - notamment le fameux fil à plomb - ne se fait pas tout à fait en direction du centre de gravité de la Terre, sauf aux pôles et à l'équateur, en raison de la rotation de la Terre (Deparis, 2013).

364. Le terme "extraire" de la consigne de l'exercice 2 fait référence à cette opération qui consiste à isoler une variable d'un côté de l'équation.

365. Le polycopié de cours reçu par les élèves l'année scolaire précédente (voir figure B.31, p. fig :CoursCinematique) précise que g vaut 9,79 à l'équateur et 9,83 aux pôles. La valeur de 9,81 correspond donc aux latitudes de la Suisse, à l'endroit où les élèves se trouvent. Dans le *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985), cette valeur n'est pas directement fournie mais peut être calculée relativement à l'altitude et à la latitude, sous l'intitulé "accélération de la pesanteur à l'altitude h et à la latitude λ" (p. 217).

de l'hypothèse qu'elle a répondu à la question en donnant la valeur qu'elle a mémorisée ou trouvée dans son polycopié, sans effectuer le calcul avec les données astronomiques. Pauline connaît effectivement cette valeur sans avoir besoin de la calculer. Cela n'explique cependant qu'une partie de sa réponse, à savoir la valeur donnée. Les opérations effectuées sur les expressions mathématiques de la loi de la force de gravitation et de la loi de la somme des forces méritent une enquête plus fine, pour tenter de formuler une hypothèse sur les divergences entre le cheminement de l'enseignant et celui de Pauline dans cet exercice.

6.2.3.2 Schématisation de Pauline : son cheminement

La réponse manuscrite de Pauline à l'exercice 2 est reproduite ci-dessous par la Figure 6.6 (p. 394), pour rappel. En commentaire à la réponse de Pauline, j'ai ajouté une désignation des quatre utilisations des signes "=" que nous trouvons dans cette réponse. Le quatrième signe égal est le lieu d'une erreur, constituant l'incident critique de notre enquête.

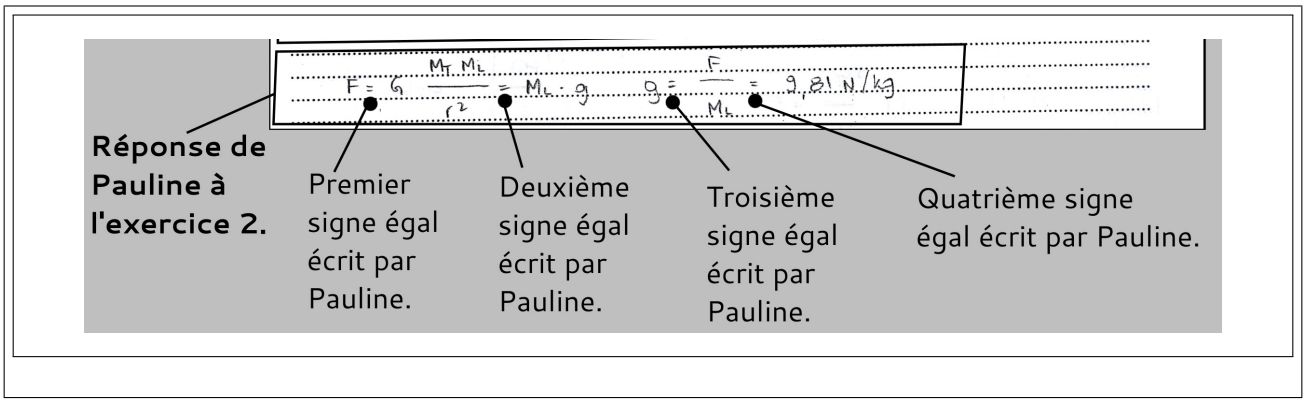


FIGURE 6.6 – Commentaires de la réponse de Pauline à l'exercice 2.

Cette réponse laisse une large part du raisonnement effectué dans l'implicite. Pour reconstruire le cheminement de pensée de Pauline lors de la schématisation de sa réponse, je vais dans un premier temps reconstruire quelques implicites à partir de sa réponse manuscrite, de manière à montrer en détail le problème qui se pose à l'occasion de la quatrième utilisation du signe "=", lors de l'énonciation d'une égalité erronée entre "$\frac{F}{M_L}$" et "$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$". Pauline commence la résolution de l'exercice 2 en écrivant la loi de la force de gravitation, comme à l'exercice 1. Cette première égalité établie par Pauline est reproduite ci-dessous par l'équation 6.3 :

$$F = G \cdot \frac{M_T \cdot M_L}{r^2} \tag{6.3}$$

En posant cette égalité, Pauline remplace directement les variables m et M de la loi respectivement par la masse de la Terre (M_T) et la masse de la Lune (M_L), ce qu'elle n'a pas explicité dans ses écritures à l'exercice 1 (voir équation 6.2), mais qui est identique au niveau du contenu, puisque Pauline utilise effectivement les données astronomiques des ces deux mêmes masses à l'exercice 1. En opérant de la sorte, en particulier en écrivant ce premier signe "=", Pauline considère *de facto* que c'est la Lune qui tombe sur

la Terre, et au voisinage d'icelle[366]. Elle continue en posant une deuxième égalité, reproduite ci-dessous par l'équation 6.4 :

$$F = G \cdot \frac{M_T \cdot M_L}{r^2} = M_L \cdot g \tag{6.4}$$

La deuxième égalité établie par Pauline pour répondre à l'exercice 2 ne reprend pas une loi, contrairement à la première égalité, mais constitue une décision[367] de Pauline de faire correspondre la force de gravitation (F) avec la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F}$), ce qui reste implicite dans sa réponse, de manière à pouvoir apposer l'expression détaillée de la somme des forces telle qu'elle est définie par la loi de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$). Cohérente avec son expression de la force de gravitation exercée par la Terre sur la Lune, qu'elle vient de spécifier ("$G \cdot \frac{M_T \cdot M_L}{r^2}$"), elle choisit pour la masse m la masse de la Lune et pour l'accélération la constante g : elle écrit "$M_L \cdot g$".

En posant cette deuxième égalité, Pauline construit implicitement un modèle permettant d'extraire g - ce qui est demandé à l'exercice 2 - à partir de la chute de la Lune sur la Terre, au lieu d'extraire g à partir de la chute de *n'importe quel objet* sur la Terre. Avec ce modèle, Pauline peut réutiliser la réponse à l'exercice 1 - la valeur de la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre ("$G \cdot \frac{M_T \cdot M_L}{r^2}$") - pour déterminer l'accélération avec laquelle la Lune tombe sur la Terre. À cette fin, Pauline commence une nouvelle expression mathématique par "g=", qui répond à la consigne ("extraire g"), en reformulant les équations 6.3 et 6.4 par une troisième égalité, reproduite ci-dessous par l'équation 6.5 :

$$g = \frac{F}{M_L} \tag{6.5}$$

En remplaçant F par la valeur calculée pour l'exercice 1, la masse de la Lune par la donnée astronomique correspondante, Pauline obtiendrait la valeur de g comme décrit ci-dessous par l'équation 6.6 :

$$\begin{aligned} g &= \frac{1.7584 \cdot 10^{20}}{7.350 \cdot 10^{22}} \\ g &= 0.00239 \end{aligned} \tag{6.6}$$

366. Bien entendu, l'élève n'a peut-être pas conscience de cette modélisation au moment de remplacer les variables. C'est néanmoins la modélisation que son discours en langage mathématique *opère*. C'est dans ce sens que j'utilise la locution "*de facto*". Par ailleurs, la Lune tombe effectivement sur la Terre au sens où la force de gravitation qui s'exerce sur la Lune par la Terre lui confère effectivement une accélération en direction de la Terre. Seulement, pour diverses raisons, cette accélération conduit la Lune à effectuer une trajectoire en ellipse autour de la Terre, sans jamais la toucher. Cette orbite autour de la Terre constitue l'équilibre entre la vitesse constante de la Lune et l'accélération provoquée par la force de gravitation exercée par la Terre sur la Lune. D'autres facteurs de moindre influence viennent cependant perturber ce qui pourrait être un équilibre immuable, comme la forme irrégulière (non-sphérique) de la Terre, ou la force de gravitation exercée par le Soleil sur la Lune. Selon les observations, la Lune accélèrent sur son orbite et s'éloigne de la Terre de quelques centimètres chaque année.

367. Le signe "=" peut être traité comme une opération logico-discursive, en langage mathématique. Ainsi, de manière analogue à ce que le verbe "être" en langue française opère parfois la description d'une propriété d'un objet, comme dans "la fleur est jaune", le même verbe peut opérer de manière fort différente et signifier une décision, comme dans "il est le chef". Sans entrer dans le détail des opérations logico-discursive en langage mathématique, je me contente ici de signaler qu'au même signe ("=") correspondent des actes psychologiques variés : c'est tantôt la répétition d'une égalité donnée par une loi, tantôt une décision de modélisation relative à la question posée.

Cependant, au lieu d'effectuer ce développement, Pauline rédige simplement une quatrième égalité "$= 9.81 \frac{Newton}{kg}$. Pourquoi Pauline écrit-elle cela ?

Pourquoi mêle-t-elle la Lune à cet exercice ?

6.2.4 Enquête quant à une situation de malentendu

Certains lecteurs - ce fut mon cas dans un premier temps - se demanderont peut-être même pourquoi la solution de Pauline ne fonctionne pas : pourquoi le résultat de ce calcul ne correspond-il pas à la valeur 9.81 m/s^2 ? Après tout, la Lune n'est-elle pas un objet quelconque ? Ne tombe-t-elle pas en chute libre vers la Terre, quoique sans jamais la toucher ? La reconstruction des attentes de l'enseignant a permis de montrer qu'il faut choisir une valeur pour la variable r de la loi de la force de gravitation, et que le rayon de la Terre constituait une option intéressante permettant de calculer une valeur moyenne et approximative de g pour n'importe quel objet en chute libre *à la surface de la Terre*. C'est également ce qui permet d'expliquer que la solution de Pauline ne fonctionne pas : la distance entre la surface de la Terre et la Lune est si grande que la valeur de la force de gravitation exercée par la Terre sur la Lune s'éloigne considérablement de celle exercée sur les objets à sa surface, de g. Par conséquent, l'accélération de la Lune résultant de l'attraction terrestre est de beaucoup inférieure à 9,81 $\frac{m}{s^2}$.

J'aborde ces questions ci-dessous dans une enquête qui propose plusieurs hypothèses quant aux raisons de la divergence constatée, et au cours de laquelle je me positionne sur leur plausibilité.

6.2.4.1 Première hypothèse : *difficulté à choisir une valeur pour la distance* r

La confrontation de la schématisation selon les attentes de l'enseignant et celle de Pauline pour répondre à l'exercice 2 nous a permis de montrer que choisir le rayon de la Terre pour la distance r de la loi de la force de gravitation peut se révéler difficile. En effet, ce choix nécessite de prendre en compte la distance entre le centre de gravité de la Terre et sa surface. Nous sommes en mesure d'émettre une première hypothèse pour expliquer la divergence entre la schématisation de Pauline et celle de l'enseignant : Pauline n'aurait pas pensé à réduire la Terre à un point, son centre de gravité, de manière à penser la distance entre ce point et l'objet en chute libre comme valeur de la variable r de la loi de la force de gravitation. Le processus de construction d'un modèle[368] mathématique permettant de proposer une réponse numérique à l'exercice 2, autrement dit la modélisation d'une situation de chute libre permettant de proposer une valeur pour l'accélération des objets en chute libre (g), demeure implicite dans la pratique de cette classe, non seulement sur la feuille d'exercice, mais aussi dans les polycopiés présentant la théorie. Par exemple, sur la feuille d'exercice la Terre est représentée à l'aide d'un disque gris, évoquant plutôt le volume du corps céleste qu'un point mathématique localisant le centre de gravité de la Terre. La réduction des objets à un point n'apparaît nulle part dans les polycopiés, et n'a fait l'objet que d'une communication orale à

368. Pour une description de la manière dont la modélisation est plus ou moins déléguées aux élèves lors des activités en classe de science, voir par exemple Gilbert (2013).

l'occasion des cours théoriques. Il est donc tout à fait possible que Pauline n'ait pas suffisamment assimilé le modèle de physique newtonienne enseigné sur ce point.

Cette première hypothèse ne me paraît pourtant pas convaincante, dans ce cas, au vu des traces à disposition : les écritures laissés par Pauline sur sa feuille d'exercices montrent qu'elle sait que la distance r se mesure entre les centres de gravité, ou centres de masse. En effet, lors de sa réponse à l'exercice 1 (voir Figure 6.4, p. 388), elle a dessiné les centres de gravité et a même ajouté une légende sur son schéma. Son schéma dessiné pour l'exercice 1 lui aurait effectivement permis, s'il avait été redessiné spécifiquement pour l'exercice 2, de choisir le rayon de la Terre comme variable r de la loi de gravitation universelle. Les traces de l'activité de Pauline indiquent qu'elle disposait des connaissances permettant de déterminer la distance entre le centre de gravité de la Terre et un objet quelconque en surface.

6.2.4.2 Seconde hypothèse : *difficulté à interpréter la mise en page*

Une seconde hypothèse peut être formulée : ce serait l'enchaînement des exercices 1 et 2 qui induirait, consciemment ou inconsciemment, Pauline à faire tomber la Lune sur la Terre pour calculer la valeur de g à l'exercice 2. Pour évaluer cette hypothèse, l'enquête s'intéresse à la mise en page de la consigne, qui prendrait un sens différent chez Pauline et chez l'enseignant.

Je fais l'hypothèse d'une interprétation spécifique de la mise en page de la feuille d'exercice par Pauline, qui consiste à prendre la séquentialité de la mise en page, dans le sens de la lecture (c'est-à-dire de gauche à droite, puis de haut en bas de la feuille d'exercices), comme faisant référence à une suite d'actions reliées entre elles et nécessaires pour réussir les exercices. Pour examiner la vraisemblance de cette hypothèse, je vais proposer une lecture séquentielle de la feuille d'exercice de gauche à droite et de haut en bas et examiner si en procédant ainsi on aboutit à la schématisation de Pauline. La figure 6.7 (p. 398) présente un premier découpage de la feuille en quatre parties, A, B, C et D, selon leur ordre d'apparition de haut en bas.

La première partie, A, présente un discours d'enseignement en langue naturelle et en langage mathématique. La partie B regroupe les questions auxquelles l'élève est invitée à répondre, et suggère par son titre "Applications" que les savoirs de la partie A doivent être utilisés pour produire les réponses. Ce lien est également explicité par des opérations de reprises des classes-objet {Lune} et {Terre} à l'exercice 1, et de {force gravitationnelle, force d'attraction}. La partie C présente une liste de "données astronomiques" à compléter à partir du *Formulaire & Tables*. Cette partie C invite à un autre type d'activité que la partie B, puisqu'il s'agit de copier des valeurs plutôt que de répondre à des questions. Copier des valeurs n'a pas tellement de sens, dans le contexte, et le contrat didactique peut conduire les élèves à interpréter la présence de ces valeurs comme une obligation de les utiliser pour réussir les exercices, qui se trouvent dans la partie B. C'est effectivement le cas pour l'exercice 1 : l'élève devra passer par-dessus la consigne de l'exercice 2 pour compléter la partie C, avant de revenir en B lire l'exercice 2. Les valeurs de la partie C se trouvent, dans l'ordre séquentiel de présentation de la feuille d'exercice, *en-dessous* des questions des *deux* exercices, et ces valeurs sont effectivement utiles pour répondre aux deux exercices. Ainsi, cette lecture

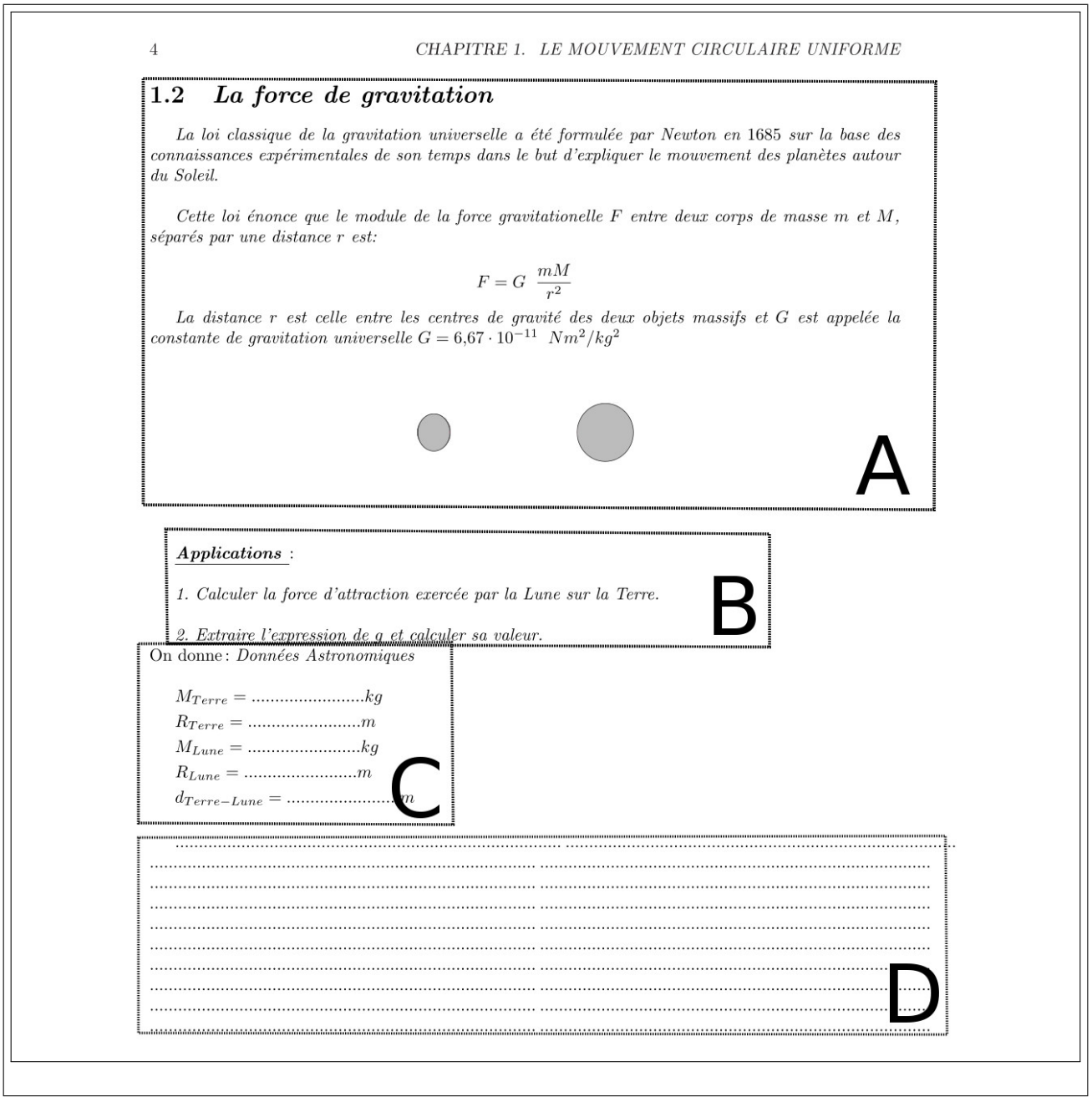


FIGURE 6.7 – Découpage de la feuille d'exercices selon le sens de la lecture.

séquentielle de la feuille d'exercices orientée vers l'interprétation du travail à effectuer aboutit à la suite d'actions suivantes :

— il faut d'abord lire le discours d'enseignement (partie A) ;

— ensuite lire les questions 1 et 2 (partie B), mais sans y répondre encore puisque pour le faire il faudra compléter les données astronomiques (voir ci-dessous) ;

— puis compléter les données astronomiques à partir du Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie (1985) (partie C) ;

— et finalement rédiger les réponses aux exercices 1 et 2 (partie D).

La lecture des questions constitue, si l'on suit l'ordre de la mise en page, une étape séparée de leur traitement en vue d'une réponse par l'élève, qui se ferait plus tard, dans la partie D, dont la fonction est de donner un espace à l'élève pour écrire, signifié par les lignes pointillées selon la convention scolaire du lieu. Or, cette partie offre un seul espace pour répondre aux deux exercices. Si l'on ajoute à ces éléments l'usage partiellement commun des données de la partie C, il semble que la lecture séquentielle de la mise en page de la feuille conduit à rapprocher les exercices, voire à les considérer comme constituant un seul et même exercice en deux étapes.

Le sens que donne la lecture séquentielle à la mise en page est probablement en partie voulu, puisque du point de vue de l'enseignant les exercices 1 et 2 sont tous deux des exercices "d'application" de la loi de la force de gravitation. Mais le lien envisagé par l'enseignant se situe à un niveau plus abstrait que celui qu'effectue Pauline, en faisant tomber la Lune sur la Terre pour "extraire l'expression de g" : c'est l'orientation de Pauline vers une interprétation procédurale de la séquentialité de la mise en page, vers une suite d'actions à effectuer, qui différerait du point de vue de l'enseignant qui rapproche les exercices 1 et 2 uniquement en ce qu'ils permettent tous deux un usage de la loi de la force de gravitation fournit en haut de la feuille.

6.2.4.3 Énonciation des divergences selon les points de vue

A présent, il reste à décrire précisément ce sur quoi porte la divergence entre Pauline et les attentes de l'enseignant. Je présente ici uniquement le résultat approximatif de la divergence dans les opérations logico-discursives mises en œuvre par les interlocuteurs, énoncé en langage vernaculaire. L'énonciation précise de la divergence est présentée dans le langage de la logique naturelle, en annexe (voir section D.3.2.1, p. 971). La divergence entre le point de vue de l'enseignant et celui de Pauline porte sur le lien entre les exercices 1 et 2.

Du point de vue de l'enseignant, le discours d'enseignement dans la partie A de la feuille d'exercices est relié aux exercices par le titre "application", qui se distribue sur les deux exercices de manière analogue. Dès lors, le lien entre l'exercice 1 et 2 est schématisé par l'enseignant comme une *analogie*, et non comme une *séquence* entre les exercices. Plusieurs arguments peuvent être donnés en faveur de cette hypothèse : la proximité des exercices 1 et 2 du fait qu'ils sont donnés sur la même feuille, à la suite, et qu'ils nécessitent tous deux l'usage de la loi de gravitation universelle et d'au moins une partie des "données astronomiques", d'une part, et leur indépendance, d'autre part, qui tient notamment au fait qu'on peut réussir l'exercice 2 sans avoir réussi l'exercice 1. Le rapport qu'entretiennent deux configurations analogues permet justement cette proximité tout en maintenant une indépendance dans le détail. En langage courant, on peut dire que les exercices 1 et 2 entretiennent des relations analogues à la loi de gravitation (une relation d'usage qui est, dans le détail, différente pour les deux exercices), mais pas une relation directe l'un avec l'autre. Par ailleurs, la nature de l'opération logico-discursive d'organisation raisonnée "$\xrightarrow{application}$" est suffisamment vague pour se référer à des usages divers de la loi de la force de gravitation.

Le point de vue de Pauline est difficile à spécifier, car nous ne disposons d'aucune trace discursive directement correspondante à l'opération utilisée par l'enseignant ($\xrightarrow{application}$) au niveau du sous-titre "applications". Cependant, je fais l'hypothèse que Pauline diverge déjà quant aux éléments mis en relation, et je vais tenter de décrire les éléments qu'elle met en relation dans sa schématisation, avant d'examiner d'éventuelles divergences quant à la qualité de cette relation, c'est-à-dire sur le fait qu'il ne s'agit probablement pas d'une relation *analogique* du point de vue de Pauline.

Alors que l'enseignant met en relation l'exercice 1 avec le discours d'enseignement de la partie A, et ensuite l'exercice 2 avec le même discours d'enseignement, je fais l'hypothèse que Pauline met en lien l'exercice 1 avec le discours d'enseignement de la partie A (notamment en utilisant le schémas de la Terre et de la Lune pour cet exercice), puis qu'elle met directement en lien l'exercice 2 avec sa schématisation construite pour répondre à l'exercice 1. Sur ce dernier point, la schématisation de Pauline diverge de celle de l'enseignant quant aux éléments mis en lien.

Voici les arguments en faveur de cette hypothèse. Premièrement, cette hypothèse établit une continuité dans le cheminement de pensée de Pauline : si l'exercice 2 continue l'exercice 1, il est tout à fait raisonnable de reprendre la chute de la Lune sur la Terre pour "extraire g". Deuxièmement, la mise en page qui présente les exercices 1 et 2 à la suite, les données en-dessous et un espace commun aux deux exercices pour écrire peut également aller dans le sens d'une configuration reliant le discours d'enseignement de la partie A de la feuille d'exercices, d'une part, et les deux exercices, d'autre part. Troisièmement, les opérations dont je fais l'hypothèse pour rendre compte du processus de schématisation de Pauline sont plus économiques sur le plan cognitif que les opérations escomptées par l'enseignant. C'est une préoccupation importante de toute activité scolaire que de fournir le moindre effort pour effectuer la tâche demandée, en raison des contraintes qui pèsent sur l'activité cognitive dans le milieu (temps limité à disposition, évaluation, etc.). Le fait d'interpréter l'exercice 2 comme une suite de l'exercice 1 permet à Pauline de ne pas s'engager dans un processus de modélisation une deuxième fois, comme elle a déjà dû le faire pour l'exercice 1 [369]. Au lieu de prendre un objet quelconque qui tombe à la surface de la Terre, Pauline réutilise la modélisation de l'exercice 1 (considérant *de facto* la chute de la Lune sur la Terre) pour passer directement aux équations et à la transposition des valeurs dans l'expression mathématique.

En conclusion, la divergence entre les schématisations de l'enseignant et de Pauline se résume comme suit :

du point de vue de l'enseignant la question de l'exercice 2 est organisée dans un lien avec l'ensemble du discours de la partie A, explicité par le sous-titre "applications" ;

du point de vue de Pauline la question de l'exercice 2 est implicitement organisée dans un lien avec le discours qui précède sur la feuille d'exercices en procédant dans le sens de la lecture, à savoir avec l'exercice 1, et plus particulièrement avec la réponse qu'elle a construite à la question de l'exercice 1.

369. Les écritures de Pauline sur les disques gris dans la partie A de la feuille d'exercices sont les traces qui nous sont restées de cette activité.

6.2.5 Discussion

Cette situation de malentendu se joue autour de l'organisation raisonnée des exercices 1 et 2, et de la loi de gravitation universelle qu'il s'agit d'utiliser pour les réussir. Pauline, lors de son interprétation de l'exercice 2, effectue une organisation raisonnée différente de celle qui est attendue par l'enseignant. Nous avons vu que des détails de la mise en page de la feuille d'exercices ont probablement joué un rôle, dans cette interprétation de Pauline, comme peut-être le fait que son opération d'organisation raisonnée constitue un effort cognitif moindre que celle attendue par l'enseignant.

Comme souvent après l'analyse d'une situation de malentendu, celle-ci permet de mettre en évidence quelques implicites importants dans la situation d'interlocution étudiée. Pour l'exercice 2, le travail de modélisation qui est dévolu à l'élève - à savoir représenter un objet quelconque à la surface de la Terre pour définir les variables impliquées dans la loi de gravitation universelle - demeure complètement implicite. Le travail de modélisation équivalent pour l'exercice 1 est aussi largement implicite, mais dispose néanmoins d'un schéma de la Terre et de la Lune et, surtout, est plus proche de l'expression en langage naturel de la question, puisque celle-ci fait explicitement référence aux objets schématisés (la Terre et la Lune). De plus, dans l'exercice 1, il suffit de remplacer les variables de l'équation de la loi de la force de gravitation par les données astronomiques listées au-dessous : ces valeurs, pertinentes du point de vue de l'enseignant, peuvent n'être reprises par l'élève que par habitude, effet de mise en page, ou par obéissance au contrat de communication, sans le raisonnement sur la situation réelle à laquelle l'exercice fait référence qui permet de juger de la pertinence ou non de ces valeurs.

L'expression en langage naturel de la question 2, par contre, est plus technique et fait uniquement référence à des opérations mathématiques, alors qu'un travail de modélisation préalable est indispensable. Or, ce travail de modélisation est considéré par les enseignants de l'établissement [370] comme le principal objectif d'apprentissage de la physique au secondaire II. Plus particulièrement, l'exercice 2 devrait permettre aux élèves de comprendre *pourquoi* g est une constante - ce qui lui vaut un nom sous la forme d'une lettre - et à quelles conditions g peut effectivement être considérée constante [371]. Si le travail de modélisation demeure néanmoins implicite dans cette situation, comme c'est presque toujours le cas dans la pratique de l'établissement, c'est plutôt pour des raisons pédagogiques ou didactiques : la démarche pédagogique adoptée (au moins dans la séquence étudiée) vise à faire redécouvrir aux élèves cette modélisation, à travers l'usage des résultats (principalement des formules algébriques) dans des exercices permettant d'effectuer quelques calculs fondamentaux (comme, pour l'exercice 2, la détermination de g).

Néanmoins, mes observations me conduisent à penser que laisser dans l'implicite les décisions prises à l'occasion du processus de modélisation entraîne un risque important : les élèves effectuent avec succès des opérations mathématiques sur des équations, sans pour autant atteindre les objectifs d'apprentissage

370. Selon les conversations informelles partagées avec le chercheur en salle des maîtres.
371. Le polycopié de cinématique (voir figure B.31, p. 831) que les élèves ont reçu l'année précédente comprend une présentation explicite des variations de g en fonction de la latitude, et les valeurs de g pour l'équateur ($9.78 \frac{m}{s^2}$) et le pôle Nord ($9.83 \frac{m}{s^2}$).

plus ambitieux, que ce soit au niveau d'une compréhension du modèle élaboré par Newton, ou quant au processus même de construction d'un modèle en physique, c'est-à-dire au niveau épistémologique [372].

La difficulté pour Pauline aurait aussi pu apparaître quant à la mobilisation de la seconde loi de Newton, lors de la résolution de l'exercice 2, mais cela n'a pas été le cas parce qu'elle a su faire le lien avec d'autres tâches qu'elle a effectuées en cours de physique. Ces liens et transferts entre des tâches différentes mobilisent également la compréhension générale du modèle enseigné : c'est justement à l'occasion des décisions prises dans l'apposition d'expressions mathématiques issues de processus de modélisation variés - comme les quatre lois présentés en introduction au chapitre - que se joue notre situation de malentendu. La décision de prendre la Lune comme masse m en chute libre, de même que certains usages inattendu du signe "$=$", indiquent que la difficulté du point de vue de l'élève concerne plutôt le rapport des expressions mathématiques au monde des phénomènes, que les règles et conventions d'usage relatives au calcul proprement dit.

A ce propos, j'aimerais encore revenir sur les choix effectués lors de la conception de cet exercice, au niveau de la transposition didactique. La tâche de l'élève consiste à retrouver ce rapport entre monde supra-lunaire et monde sub-lunaire que Newton a permis d'établir avec sa mécanique. Mais cette tâche est toute entière sous forme de calcul mathématique, et peut être réussie sans modéliser ni théoriser. Cette tradition a certes le mérite d'enseigner le maniement des équations, mais est de fait très éloignée de la pratique de la mécanique de Newton dans ses ouvrages de *Philosophie de la Nature*, dont le problème principal est bien de théoriser, et ensuite de construire un *modèle mathématique*, pour pouvoir mesurer et prédire des phénomènes du monde physique. Dans la perspective de l'histoire des idées, sa théorie n'a été réduite à des *lois* exprimées en langage mathématique que bien plus tard, et notamment à des fins d'enseignement. Ainsi, je serais tenté d'affirmer que la transposition didactique effectuée fait de cette feuille d'exercices une tâche particulièrement sensible à l'émergence de situations de malentendu, ne serait-ce que du fait qu'elle laisse dans l'implicite les éléments centraux des objectifs d'apprentissage choisis : une loi permettant de déterminer à la fois l'accélération d'un objet quelconque à la surface de la Terre et la force de gravitation entre deux corps célestes.

Une autre remarque sur la transposition didactique concerne plus généralement la présentation et mise en signe des valeurs constantes dans la séquence d'enseignement étudiée. Au niveau sémiotique, il y a dans la tradition scolaire du lieu une mise en évidence des valeurs constantes qui participe à entretenir le mystère sur ce que sont ces nombres, tout en les mettant au devant de la scène. Les constantes prennent, pour ainsi dire, le rôle de "produits" - ou de "révélation" - de la découverte scientifique, dont les enseignants sont fiers de faire l'exposition. Par exemple, le fait de les désigner par des lettres ("g" et "G") les individualise tout en masquant leur statut épistémique en physique : "g" est une accélération en $\frac{m}{s^2}$ alors que "G" est une

372. A titre personnel, j'aimerais insister sur l'importance de ces objectifs ambitieux, car ils visent non seulement l'acquisition et l'usage d'instruments de pensée comme la loi de la force de gravitation, mais également une compréhension générale des fondements épistémologiques de la physique newtonienne, à savoir l'acquisition d'une compréhension de la manière dont cette loi de la force de gravitation a été élaborée et quelles sont ses limites. Or, comme l'ont montré Driver et al. (1994), un usage pertinent des instruments de pensée en physique au-delà des exercices scolaires ne peut être raisonnablement attendu des élèves qui n'ont pas aussi compris les fondements épistémologiques de la discipline.

grandeur scalaire qui s'exprime en $\frac{m^3}{kg \cdot s^2}$, ce qui ne correspond à aucun unité de mesure conceptualisée. Si l'usage de la lettre "G" est désormais conventionnel en physique pour désigner la constante de gravitation universelle, sans doute en raison de l'importance historique de la découverte de cette constante, elle a été introduite et mesurée bien après Newton, en 1798. Du point de vue de l'élève, ces éléments historiques pourtant essentiels à la compréhension de la discipline et de son fonctionnement épistémologique, sont "cachés" derrière une lettre dont on ne comprend pas pourquoi il est fait usage alors que d'autres nombres importants sont exprimés uniquement en chiffres. Au final, pour nombre d'élève, "g" n'est jamais rien de plus qu'un chiffre parmi d'autres (sinon qu'il faut l'apprendre par cœur), et qu'il s'agit d'utiliser pour réussir son calcul.

Cette mise en évidence issue de la tradition peut même interférer avec des exigences scolaires. Par exemple, comment justifier la disposition graphique conventionnelle de l'expression mathématique de la loi de gravitation universelle où une place d'honneur est donnée à "G" en écrivant "G $\cdot$ $\frac{m \cdot M}{r^2}$" au lieu de "$\frac{G \cdot m \cdot M}{r^2}$" ? Dans d'autres situations du même milieu scolaire, une telle disposition pourrait conduire à une demande de correction par l'enseignant. Les accrocs entre enseignants de mathématique et enseignants de physique sont d'ailleurs réputés, sur ce genre de questions. Nous verrons lors de la prochaine situation de malentendu, tout particulièrement au sujet de g, que la logique qui a conduit à la construction de conventions d'écriture, au fil de l'histoire des idées et des traditions scolaires, peut effectivement jouer un rôle dans l'émergence de situations de malentendu dans une classe, quelques décennies ou siècles plus tard [373].

373. Dans le cadre de cette recherche, je n'ai malheureusement pas pu pousser l'enquête dans une perspective historique, de manière par exemple à trouver le moment et les raisons de l'introduction de la lettre "g" pour désigner l'accélération des objets en chute libre à l'école, et la répartition géographique de telles conventions. J'ai néanmoins eu l'occasion de remarquer que certaines tâches - comme les chariots attachés à des cordes et glissant sur des pentes - remontent aux livres du $XVII^{ème}$ siècle ; autrement dit, ce sont les mêmes exemples, dans certains cas, qui ont été utilisés pour introduire la théorie, par leurs auteurs, et pour l'enseigner, par les enseignants. Comme les enjeux argumentatifs ne sont souvent pas les mêmes, dans le débat du $XVII^{ème}$ siècle au moment de la théorisation et dans la salle de classe, au moment de l'exposition d'une théorie axiomatisée et terminée, l'enquête historique quant aux conventions, exemples et tâches utilisés me paraît particulièrement pertinente pour comprendre le milieu sémiotique dans lequel émergent les situations de malentendu comme celles que nous mettons en évidence ici.

6.3 Situation #2 : *g comme gravité.*

6.3.1 Résumé

Les élèves répondent individuellement à une série de questions lors d'un pré-questionnaire, questions conçues par l'enseignant pour une évaluation diagnostique des conceptions des élèves au début de la séquence. La première question demande aux élèves de comparer la vitesse de chute de deux objets en chute libre. L'enseignant s'attend à trouver des réponses correctes et des réponses correspondant à une préconception décrite dans la littérature. Or, un tiers des réponses à cette question ne se laissent assimiler ni à l'une ni à l'autre de ces catégories, mais se situent "quelque part entre les deux" [374]. Que s'est-il passé ?

L'analyse de ces réponses ambiguës me permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu impliquant plusieurs élèves, et qui se prolonge à divers moments de la séquence. La divergence entre les points de vue de l'enseignant et des élèves consiste en l'usage, par plusieurs élèves, d'une classe-objet indifférenciée, qui reprend sans distinguer la constante g de valeur $9.81\frac{m}{s^2}$ et la classe-objet {force gravitationnelle, force de gravité, ...} de la schématisation de l'enseignant. Autrement dit, ces élèves partent du discours de l'enseignant - qui insiste beaucoup dans son discours oral sur l'idée de la constante valant 9,81 - pour construire une classe-objet partiellement indifférenciée pour l'accélération des objets en chute libre, l'attraction terrestre, la pesanteur, la force de gravité ou de gravitation, voire même les forces de frottement.

L'hypothèse d'une situation de malentendu pour rendre compte des réponses ambiguës permet-elle un éclairage nouveau de la difficulté des élèves à apprendre la physique ? Cette hypothèse se distingue des explications habituelles de la littérature, faisant référence à des préconceptions ou représentations mentales individuelles, parce qu'elle met en évidence comment les élèves aboutissent à leurs réponses (jugées erronées) en reprenant des objets de discours introduits par l'enseignant lui-même, ou par les ressources à disposition des élèves (consignes des exercices, manuel de référence, etc).

La discussion de cette situation de malentendu permet de réorienter le regard sur les difficultés des élèves à réussir ce type de tâche, en décrivant les transformations que les élèves opèrent sur la schématisation de l'enseignant et de ses ressources discursives. En effet, dans cette situation de malentendu, les élèves ne procèdent pas de l'observation du comportement des objets physiques pour produire des réponses à l'item#1, comme l'enseignant s'y attendait, mais procèdent plutôt des discours à disposition et en particulier de la schématisation de l'enseignant, pour construire leur propre schématisation en réponse à l'item #1. Or, si les réponses ambiguës font usage d'un objet de discours moins bien différencié que la schématisation originale de l'enseignant, les réponses non conformes au modèle enseigné s'expliquent parfois aussi par les implicites de la consigne : la prise en compte d'une force de frottement par les élèves

374. Discours de l'enseignant en situation, rapporté par le chercheur.

peut par exemple les conduire à produire une réponse semblable à celle décrite dans la littérature comme une “préconception”.

6.3.2 Présentation des incidents critiques

6.3.2.1 Présentation de la tâche

Pour cette analyse, je vais examiner les réponses des élèves à la première question du pré-questionnaire. La figure 6.8 (p. 406) présente la question telle que les élèves l'ont reçue pour une passation individuelle sur format papier, et à laquelle je ferai référence par la suite sous l'appellation *item #1*.

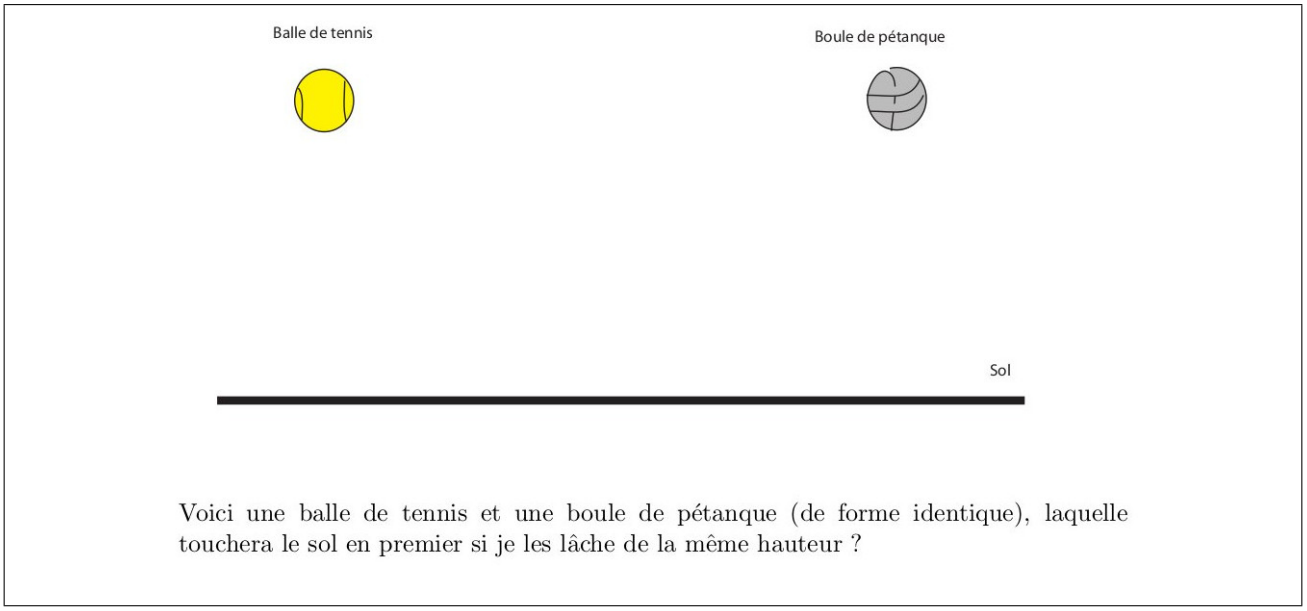


FIGURE 6.8 – Item #1 du questionnaire.

Cette question a été conçue dans le cadre du travail de mémoire professionnel de l'enseignant, dans le but d'effectuer une évaluation diagnostique des préconceptions des élèves avant la séquence d'enseignement (voir chapitre 4.4, p. 289 et suivantes). Étant donné ce but, je vais considérer qu'il y a incident critique lorsque la réponse d'un-e élève à l'item #1 ne peut être assimilée ni à une préconception ni à une réponse correcte, autrement dit lorsque la fonction diagnostique de l'évaluation échoue. Avant de présenter les réponses des élèves et de discuter d'éventuels incidents critiques, je propose une première reconstruction du point de vue de l'enseignant à partir de sa schématisation des réponses correctes et de celles qui correspondent à la préconception, telles qu'il les anticipe.

6.3.2.2 Présentation des réponses escomptées

Du point de vue de l'enseignant, l'item #1 met en scène deux masses différentes au lieu d'une seule, dans l'objectif de faire découvrir aux élèves un invariant. En effet, les élèves sont invités [375] à calculer l'accélération ou la vitesse des deux masses en chute libre afin de les comparer. Le résultat attendu de

375. Le fait de présenter deux objets différents quant à leur masse invite à les comparer, plus particulièrement quant aux effets de cette différence de masse.

cette comparaison serait de constater que l'accélération du corps en chute libre est la même, quelle que soit la masse des corps. L'élève justifierait sa réponse en effectuant une comparaison des valeurs d'accélération des deux balles qui résultent des sommes des forces exercées sur chacune des balles, en fonction de leur masse ; ou justifierait sa réponse en comparant les valeurs de vitesse de chute des deux balles, ce qui permet d'évaluer le temps pris pour chaque balle à parcourir la distance qui la sépare du sol. La comparaison peut être effectuée en posant des valeurs fictives des masses pour chacune des balles, ou directement à un niveau plus abstrait par comparaison entre elles à l'aide d'équations algébriques.

Cet exercice est difficile pour les élèves, et l'enseignant connaît ces difficultés, en particulier le passage du problème exprimé verbalement à l'usage du langage mathématique dont il est attendu qu'il soit utilisé comme ressource pour la justification de la réponse. Les enseignants de physique de cet établissement sont unanimes à reconnaître les difficultés que les élèves ont à fournir "l'argumentation" demandée, et de leur point de vue même les meilleurs élèves ne fournissent que des justifications lacunaires [376].

Voici un extrait du mémoire professionnel de l'enseignant où il exprime le raisonnement attendu de la part des élèves :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p.17

> Pratiquement, la balle de tennis et la boule de pétanque arrivent... en même temps! Tous les objets sont attirés vers le centre de la Terre par une force; la force de gravitation. Lorsque la résistance de l'air n'entre pas en jeu (objets denses, de forme aérodynamique et sensiblement de mêmes dimensions), ce n'est pas la masse mais l'intensité de la pesanteur qui est déterminante (l'accélération est la même pour tous les corps en chute libre, en un lieu donné ; elle est égale à l'intensité de la pesanteur).

Il convient de remarquer que le raisonnement permettant d'arriver à la conclusion que les deux balles "arrivent en même temps" est valide, selon l'enseignant, à condition d'ignorer la résistance de l'air (les forces de frottement). Je reviendrai sur les conditions de validité du raisonnement proposé par l'enseignant lors de la discussion consacrée aux implicites de cette situation de malentendu, car l'enseignant ne présente pas explicitement ces conditions aux élèves dans ses supports de cours ni dans le corrigé oral à la fin de la séquence. Les quelques échanges parmi les enregistrements audio et vidéo qui portent sur le frottement, par exemple, sont tous initiés par les élèves.

Dans son mémoire professionnel, l'enseignant formule également quelques difficultés spécifiques des élèves, quand il traite de l'item #1 du pré-questionnaire et présente les enjeux de cet exercice. Ces difficultés

376. Observations directes du chercheur, discussions entre enseignants lors des pauses.

font partie des réponses escomptées par l'enseignant [377], quand bien même elles ne sont pas conformes aux savoirs enseignés.

Voici ce passage, reproduit dans son intégralité :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p.17

```
1  Dans cette première situation, on remarque qu'un mode de raisonnement apparaît chez la
2  plupart des élèves. Cela revient tout d'abord à considérer seulement les actions du
3  corps étudié sur lui-même. Ainsi on dira que si on lâche une pierre, elle tombe par
4  terre, à cause de sa lourdeur. Alors qu'en mécanique classique, ce sont les forces
5  extérieures (ici les forces de gravitation) à l'objet qui sont responsables du
6  mouvement et non l'objet qui possède un capital (voire une volonté) lui permettant de
7  retourner à sa position naturelle (le lieu naturel selon Aristote). On peut aussi
8  constater que certains élèves pensent que la vitesse de chute est proportionnelle au
9  poids. Cette hypothèse fausse, est toujours d'actualité, bien que datant du XVIe siècle.
10 Elle est souvent prise comme une vérité établie, alors qu'elle est bâtie sur l'opinion
11 courante. "L'opinion pense mal ; elle ne pense pas : elle traduit des besoins en
12 connaissances. En désignant les objets par leur utilité, elle s'interdit de les
13 connaître. On ne peut rien fonder sur l'opinion : il faut d'abord la détruire.
14 Elle est le premier obstacle à surmonter." (1)
```

(1) La citation est de Bachelard (1938/1972).

L'enseignant anticipe une réponse erronée. Son caractère dépassé est communiqué par la référence à une théorie du XVI^{e} siècle qu'il identifie par une relation proportionnelle entre la vitesse de chute de l'objet et son poids ou, plus précisément, "sa lourdeur". Cette réponse fréquente des élèves est documentée dans la littérature, et diverses explications sont proposées sur lesquelles nous reviendrons lors des commentaires après l'analyse (voir section 6.3.6.2, p. 452). Il suffit, pour l'instant, de retenir que, du point de vue de l'enseignant, une réponse d'élève donnant la boule de pétanque première dans la chute sera assimilée au mode de raisonnement prévalant avant la mécanique classique, ou, selon les termes de Bachelard cités ci-dessus, sera assimilée à une "opinion" qui constitue un "obstacle à surmonter".

Ces quelques traces fournissent une schématisation des réponses escomptées par l'enseignant, qu'il les juge correctes ou erronées. A partir de cette reconstruction sommaire du point de vue de l'enseignant, je considérerai qu'une réponse d'élève occasionne un incident critique lorsque je ne peux pas l'assimiler à ce point de vue sans l'enrichir ou le modifier, c'est-à-dire lorsque la réponse de l'élève exigerait de l'enseignant

377. Il peut paraître étrange que je considère que l'enseignant compte sur des difficultés chez les élèves, voire qu'il les espère - puisque le terme escompter choisi à dessein comprend cette idée d'espérance - mais, en fait, c'est justement une compétence de l'enseignant que de compter sur des difficultés spécifiques des élèves, qui lui permet de réagir de manière appropriée dans la situation d'enseignement et d'accompagner au mieux ces élèves. En outre, aussi étrange cela puisse-t-il paraître au néophyte, il va de soi qu'un enseignant *espère* être utile dans l'exercice de sa profession et, dans ce but, il *espère* des réponses non conformes aux savoirs enseignés qu'il se réjouit de corriger, car ce sont là des conditions indispensables au sentiment d'exercer sa profession avec efficacité, d'effectivement *enseigner quelque chose* aux élèves.

une accommodation de son point de vue [378]. Examinons à présent les réponses des élèves afin d'évaluer si elles se laissent assimiler au point de vue de l'enseignant ou non.

6.3.2.3 Présentation des traces

Le corpus de traces ne contient pas d'évaluation individuelle des réponses des élèves par l'enseignant, car cette évaluation n'a pas eu lieu. Le questionnaire a servi à établir la présence de la préconception anticipée pour cet item dans le mémoire de recherche de l'enseignant, et à orienter les échanges avec les élèves sans donner lieu à un retour individuel aux élèves. Cela s'explique par une décision d'ordre pédagogique : la passation du pré-questionnaire a été conçue par l'enseignant comme une évaluation diagnostique des conceptions des élèves. Il propose ce questionnaire aux élèves comme une première réflexion sur des situations-problèmes, dont il annonce qu'elles seront reprises tout au long de la séquence d'enseignement, dans le but de leur laisser la possibilité de discuter entre eux de leurs réponses et de faire évoluer leurs connaissances par leurs activités propres. Il dit également aux élèves qu'ils auront la possibilité de vérifier leurs réponses lors des activités expérimentales en fin de séquence. Dès lors, les premières réponses des élèves lors de la passation en individuel et sur format papier du pré-questionnaire ne sont délibérément pas commentées par l'enseignant.

L'enseignant fait travailler les élèves une deuxième fois sur l'item #1, lors des activités sur le logiciel *Digalo*, puis une troisième fois, dans des activités expérimentales organisées en parcours avec un poste par item, avant d'y revenir lui-même lors d'une quatrième étape en fin de séquence, dans un exposé qui reprend systématiquement chacun des six items du pré-questionnaire. Pour résumer, voici les diverses phases de la séquence (voir tableau 4.2, p. 306) où cette question est travaillée par les élèves :

— le moment de passation individuelle sur format papier du pré-questionnaire (phase 1) ;

— le moment de discussion en groupe et entre groupes sur *Digalo* (phase 3) ;

— le moment de d'investigation en groupe avec du matériel expérimental spécifique à chaque item (phase 4) ;

— le moment du discours de l'enseignant à la classe, et d'un éventuel dialogue avec les élèves (phase 5).

378. Cette démarche repose sur le *contrat didactique* (Brousseau, 1998/2004), en vigueur dans le contexte scolaire, puisque dans ce contexte de communication les réponses escomptées par l'enseignant, qu'il les juge correctes ou erronées, fournissent justement la définition du *contrat de communication*, et dans ce cas exclusivement sur la base du point de vue de l'enseignant. Dès lors, dans ce *jeu didactique*, les réponses des élèves qui ne sont pas assimilables aux termes de ce contrat constituent, sur le plan de la communication, des *incidents critiques*. Nous verrons d'ailleurs au cours des analyses quelques moments où l'enseignant, lorsqu'il ne parvient pas à assimiler les réponses des élèves aux réponses escomptées, accommode son point de vue en cours de séquence, ce qui a pour conséquence de modifier ou, au moins, de spécifier le contrat didactique. Le fait de considérer ou non les forces de frottement est un des points du contrat qui fait l'objet d'une telle modification dans cette situation #2. Ces modifications restent néanmoins exceptionnelles, et pour cause : le contrat de communication a justement pour fonction de stabiliser les attentes des interlocuteurs. Le problème, en contexte scolaire, consiste à l'asymétrie existante dans l'établissement du contrat, qui ne prend en compte que le point de vue de l'enseignant. Nous y reviendrons dans les commentaires à cette situation.

Cette liste de moments a uniquement pour but de fournir une référence pour situer les traces utilisées en cours d'analyse. Ce n'est pas la liste des moments où les élèves discutent effectivement de la question posée, mais uniquement les moments où il est officiellement question de l'item #1. En effet, il faudrait encore ajouter tous les moments où les élèves choisissent par eux-mêmes de se référer à cet item pour réfléchir et discuter une autre question. Dans mes observations, les références à l'item #1 au cours des conversations entre élèves varient grandement selon les élèves : il n'y a aucun enregistrement de ce type pour certains élèves, une ou plusieurs occurrences pour d'autres. En outre, le temps effectif passé à travailler aux questions varient également selon les élèves. Ces différences importantes sont invisibles dans la présentation générale ci-dessus. Cette liste m'a néanmoins permis de repérer dans l'ensemble du corpus d'enregistrements audio et vidéo (1) des extraits de conversation entre élèves, que j'utilise pour suivre l'évolution de la situation de malentendu, et (2) des extraits du discours de l'enseignant, permettant de reconstruire son point de vue à partir de la schématisation qu'il fait de l'item #1 en situation pédagogique, et non seulement à partir du discours écrit dans le mémoire professionnel après la séquence.

Je propose de ranger les productions des élèves en trois catégories avant d'entrer dans la reconstruction détaillée de points de vue spécifiques. La première catégorie comprend les réponses assimilables à une préconception selon la schématisation qui en est faite par l'enseignant dans son mémoire professionnel ; la deuxième comprend les réponses conformes au modèle enseigné de la physique newtonienne, toujours selon le point de vue de l'enseignant ; et la troisième catégorie comprend les éventuelles réponses qui ne correspondent ni à la première ni à la deuxième définition, c'est-à-dire aux réponses qui n'ont pas été escomptées par l'enseignant. Si l'enseignant, dans l'exercice de sa profession, n'a évidemment pas pu mener la (très) longue enquête que je propose dans cette recherche, il a néanmoins eu l'occasion de me dire oralement comment il jugeait ces réponses d'élèves, et il m'a signifié son accord *grosso modo* avec la répartition des réponses résumée ici, à une nuance près : il a interprété la troisième catégorie de réponses comme étant des réponses "quelque part entre-deux", entre le correct et l'erroné. Cette interprétation de l'enseignant me permet de considérer ces réponses comme *résistantes* à l'évaluation diagnostique, dans le sens où en donner une interprétation faisant le diagnostic des apprentissages des élèves constitue un véritable défi pour le professionnel qui s'y trouve confronté, et qui n'a ni le temps ni les moyens techniques d'une analyse détaillée.

Plutôt que de faire référence à d'éventuelles *préconceptions* ou *méconceptions*[379], qui comprend, dans le nom de la catégorie de réponses utilisé par les chercheurs, le jugement de leur caractère erroné et une attribution implicite aux élèves, j'ai choisi une dénomination qui ne fait pas référence aux notions de *juste* ou *erroné*, *vrai* ou *faux*, car l'investigation effectuée ne me permet guère davantage qu'une comparaison entre les points de vue des acteurs impliqués. J'ai nommé ces réponses *non conforme*[380], en opposition aux

379. Terme traduit de l'anglais *misconception* (pour une discussion critique de ce terme, voir par exemple : J. P. Smith et al. (1993)).

380. Le terme *conforme* n'ayant pas de contraire en langue française, je proposerais volontiers l'adjectif *contraforme*, reprenant le préfixe latin *contra-* pour l'opposer au *cum-* latin de *con*forme. En plus de signaler la divergence avec la norme, cette nomenclature ferait également référence aux difficultés des élèves telles qu'elles sont escomptées par l'enseignant dans sa schématisation, avec l'idée d'un *contraire*. L'adjectif *contraforme* s'entendrait donc ici au sens où ces réponses ne prennent pas la forme voulue, elles sont divergentes ou déviantes par rapport à la norme scolaire, et évoquent des difficultés dans l'acquisition des savoirs visés par l'enseignant.

réponses *conformes* qui correspondent à la *norme scolaire*, c'est-à-dire aux savoirs visés par l'enseignant tels qu'ils sont définis dans sa schématisation. Néanmoins, comme nous le verrons, je ne les considère pas pour autant *erronées* - et encore moins *fausses*[381] - car un jugement sur la valeur de vérité des réponses des élèves nécessiterait une autre analyse que celle proposée ici, et une référence précise à une épistémologie, que je ne développe pas ici. Le jugement de *conformité* versus *non conformité* d'une réponse que j'effectue au cours de l'analyse ne concerne que la relation entre des schématisations des élèves et de l'enseignant, et non pas la relation entre ces schématisations et leur référent. C'est un jugement de *conformité* versus *déviance*[382] par rapport à la norme qui constitue ici les savoirs enseignés.

À partir de ce cadrage théorique, il devient possible de mener une analyse des réponses des élèves.

Les réponses non conformes

Une première catégorie regroupe un tiers des réponses (8 sur 23), que j'assimile à la schématisation de l'enseignant de la difficulté anticipée, c'est-à-dire au mode de raisonnement décrit par l'enseignant comme une vitesse de chute proportionnelle au poids ou à la lourdeur :

Réponses erronées au pré-questionnaire - item #1

```
1  Annette:  boule de pétanque, parce qu'elle est plus lourde
2  Alain:    boule de pétanque car elle a un poids + grand
3  Barbara:  La balle de pétanque car elle est plus lourde. Elle va dans le sens de la force
4            de gravitation. Comme la balle de tennis est plus légère, elle se fait arrêter
5            pendant son trajet.
6  Ernest:   La boule de pétanque car elle est plus lourde
7  Étienne:  La boule de pétanque. Car elle est plus lourde donc une accélération plus
8            rapide
9  Germaine: la boule de pétanque (plus lourde donc g plus de "pouvoir" sur sa masse)
10 Marie:    La boule de pétanque parce qu'elle est plus lourde
11 Thibault: La boule de pétanque, car elle est plus lourde et donc que son accélération
12           est plus importante
```

Ces réponses sont regroupées car elles remplissent toutes les deux critères suivants[383] :

— ces réponses donnent la boule de pétanque première lors de la chute ;

— ces réponses mentionnent explicitement le poids ou la lourdeur comme justification.

381. La notion de faute implique, en plus de l'erreur, l'attribution d'une responsabilité morale à l'élève qui ne se justifierait qu'en référence à une philosophie morale ou une éthique bien définie.

382. Le terme *déviance*, emprunté à la psychologie sociale, ne s'applique cependant que sur des conduites et me paraît trop connoté pour être repris pour qualifier des schématisations. Celles-ci n'étant guère plus qu'une *mise en forme* par le discours d'une pensée en vue d'une communication, l'insistance sur la *forme* des termes *conforme* et *non conforme* me semble appropriée pour ne pas oublier qu'il ne s'agit pas d'un jugement sur le fond, sur les compétences ou connaissances d'une ou un élève, mais uniquement sur la forme que prend sa participation au processus communicatif à un moment donné.

383. Je n'ai pas repris le critère énoncé par l'enseignant relatif à une *proportionnalité* entre vitesse de chute et poids de l'objet, car je n'observe pas l'énonciation de cette proportionnalité chez les élèves. En outre, le risque existe que cette proportionnalité soit projetée sur le raisonnement des élèves par les chercheurs sur les préconceptions auxquels se réfère l'enseignant, et abusivement attribué aux raisonnements des élèves, voire que l'on confonde ici *proportionnalité* et *fonction linéaire*.

A ces huit réponses, il faut peut-être ajouter la réponse de Julianne (voir ci-dessous), qui donne la boule de pétanque première lors de la chute, mais ne fournit aucune justification.

Réponse de Julianne au pré-questionnaire - item #1

```
Julianne: boule de pétanque
```

En effet, cette réponse peut être comparée à d'autres, partiellement identiques, en les plaçant dans l'ordre du plus implicite ou plus explicite :

Réponse de Barbara et Ernest et Julianne au pré-questionnaire - item #1

```
Julianne:      boule de pétanque
Ernest:   La   boule de pétanque car elle est plus lourde
Barbara:  La   balle de pétanque car elle est plus lourde. Elle va dans le sens de la
          force de gravitation. Comme la balle de tennis est plus légère, elle se fait
          arrêter pendant son trajet.
```

Pourrait-on dire que Julianne, Ernest et Barbara partagent la même conception ou la même opinion ? Que Barbara est seulement plus explicite que Ernest et Julianne, mais qu'ils ont tous les trois une conception commune ? Ou faudrait-il distinguer le raisonnement plus explicite de Barbara comme une conception plus construite, quand bien même Julianne et Ernest partagent peut-être cette conception mais ne l'ont pas écrite ?

Ces trois exemples illustrent la difficulté à laquelle se confrontent l'enseignant et le chercheur dans la tentative de reconstruction des points de vue des élèves : ils se heurtent assez directement au problème du rapport entre pensée et langage, en tentant d'attribuer aux élèves des conceptions ou opinions à partir de telles traces. Ce problème me paraît insurmontable. C'est une des principales raisons qui m'a conduit à m'intéresser aux situations de malentendu, et à aborder ces réponses en tant que schématisations plus ou moins élaborées. La ressemblance entre elles peut alors être décrite : ces réponses comprennent quelques opérations communes, et celles qui sont plus explicites comprennent quelques opérations spécifiques supplémentaires.

Les réponses conformes

Une deuxième catégorie regroupe à peu près un quart des réponses (6 sur 23), que j'assimile à la schématisation de l'enseignant de la réponse conforme aux savoirs enseignés. Trois réponses fournissent une justification reprenant une partie du discours de l'enseignant :

Réponse de Daniel Urs et Victor au pré-questionnaire - item #1

```
Daniel:   Si l'on considère que c'est une chute libre, les deux objets toucheront le sol
          en même temps. De plus ils auront la même accélération lors de la chute, c'est-à-
          dire a=9,81m/s2=g.
Urs:      En même temps car la force de gravité produit la même accélération (9,81m/s2)
```

```
          quelque soit la forme, la taille ou le poids de l'objet.
Victor:   Les deux balles toucheront le sol en même temps, car le poids de l'objet
          n'entre pas en vigueur lors de la chute libre
```

La réponse de Urs reprend dans sa justification l'idée de l'invariant, et les deux autres réponses de cette catégorie proposent une justification faisant référence au type de situation-problème, à savoir la "chute libre", qui est un terme utilisé par l'enseignant à plusieurs reprises dans son discours oral et fonctionne comme concept pour désigner un ensemble de problèmes de physique semblables à celui qui est étudié ici. Dans ce type de problème, il convient de ne pas tenir compte des forces de frottement, la "chute libre" étant par définition "libre" de toute autre force que la gravitation provoquant la "chute".

Les trois dernières réponses de cette catégorie prennent néanmoins en compte les forces de frottement, en donnant une réponse prenant en compte les deux cas de figure. Dans ce sens, ces réponses vont au-delà de ce que l'enseignant propose :

Réponses de Ferdinand et Pierrette et Yves au pré-questionnaire - item #1

```
Pierrette: Elles tomberont en même temps si on néglige le frottement de l'air, car la
           force de pesanteur (g) s'exerce sur les deux objets de manière identique. Le
           poids de l'objet ne change rien. La boule de pétanque tombera la première si on
           considère le frottement de l'air, car ce dernier va plus ralentir la balle de
           tennis à cause de son plus petit poids
Yves:      la boule de pétanque tombera sur le sol en premier, car elle est plus lourde.
           S'il n'y a pas de forces de frottement (air) elles toucheraient le sol au même
           instant
Ferdinand: Si la forme est identique le frottement est le même et la forme d'attraction
           aussi => elles arrivent en même temps. (La boule de pétanque atteindra le sol
           avant car elle est plus lourde.)
```

Ces trois réponses peuvent être considérées non seulement conformes au modèle enseigné, mais également comme des schématisations de l'item#1 encore plus élaborées que la réponse schématisée par l'enseignant. En effet, elles proposent un double modèle : avec ou sans résistance de l'air. Ces réponses ont néanmoins une place ambiguë par rapport aux savoirs enseignés, puisque le frottement n'est pratiquement pas discuté par l'enseignant. Nous y reviendrons.

Les traces laissées par les élèves dans les quinze réponses examinées jusque là ne permettent pas d'identifier un incident critique. Je les ai assimilées au point de vue de l'enseignant sans rencontrer de difficulté, ce qui me permet de les considérer comme "habituelles", voire "contractuelles" (c'est-à-dire alignées sur la définition du contrat didactique spécifique à cet item). Examinons à présent les réponses restantes, celles que l'enseignant n'a pas escomptées.

Les réponses ambiguës

Dans la troisième catégorie, il reste un dernier tiers des réponses (8 sur 23) à examiner. Six de ces réponses donnent les deux balles égales, c'est-à-dire une réponse qui est conforme au modèle enseigné, elles fournissent néanmoins des justifications qui paraissent non conformes :

Réponses ambiguës au pré-questionnaire - item #1

```
Cassandra: les deux balles toucheront le sol en même temps, car la force de gravité
           est la même
Ilona:     Elles arrivent en même temps. La force qui freine l'objet se fait en fonction de
           la masse
Laurie:    Elles toucheront le sol en même temps car c'est la même force de gravité qui
           agirait sur les deux balles
Ophélie:   les balles toucheront en même temps le sol. Car la même force est exécutée sur
           eux !
Sylvie:    la balle de tennis et la boule de pétanque subisse la même force d'apesanteur
           donc elle tomberont en même temps par terre
Xavier:    oui car g et le frottement de l'air sont égaler
```

Cassandra, Laurie, Ophélie et Sylvie font référence à une force qui est la "même", parfois en explicitant qu'il s'agit de la force de gravité ou la pesanteur. Or, la force de gravité exercée sur les balles est proportionnelle à la masse des balles, selon la loi de la force de gravitation (voir p. 381). Ilona et Xavier propose plutôt un argument concernant la force de frottement, qui n'est pas escompté par l'enseignant, voire, pour Ilona, un argument faisant référence à l'inertie.

Je ne peux donc pas assimiler ces réponses aux réponses escomptées par l'enseignant, ni à la réponse conforme aux savoirs enseignés, ni à la réponse que l'enseignant schématise en tant que difficulté des élèves et qu'il attribue à leur préconception. Elles apparaissent problématiques pour l'interprétation que peut en faire l'enseignant, voire manquer de cohérence interne, parce qu'on y trouve une conclusion correspondant à la réponse conforme au modèle enseigné, mêlée à des justifications qui rappellent plutôt "l'opinion" et le mode de raisonnement "dépassé" auquel se réfère l'enseignant dans son mémoire professionnel.

Les deux dernières réponses à examiner donnent pour solution à l'item #1 la boule de pétanque, tout en produisant une justification basée sur la *masse* :

Réponse de Henriette et Rose au pré-questionnaire - item #1

```
Henriette: la boule de pétanque car, bien qu'elle soit attirée par la même force vers
           le sol, sa masse étant plus grande elle tombera plus vite.
Rose:      la boule de pétanque, car sa masse est supérieure
```

Si Rose et Henriette ne faisaient pas référence à la "masse" d'une ou des deux balles, mais plutôt à la *lourdeur* ou au *poids* des balles, je pourrais assimiler leur réponse à la difficulté escomptée par l'enseignant. Cependant, si je procédais de la sorte, j'ignorerais une partie des schématisations de Henriette et Rose qui

paraît plutôt conforme aux savoirs enseignés : c'est bien la *masse* de la boule de pétanque qui est supérieure à la *masse* de la balle de tennis. Ces réponses nécessitent une enquête, car la présence du terme "masse" dans les schématisations de ces élèves est, en tant que telle, insuffisante à ce que je fasse l'hypothèse d'une appropriation par les élèves du concept de *masse* au sens des savoirs enseignés. C'est en examinant en détail l'usage qui est fait du terme et les implications de cet usage dans la situation pédagogique que je peux, éventuellement, proposer des hypothèses quant au cheminement de ces deux élèves.

L'usage n'est pas le même chez Henriette et chez Rose, puisque la réponse d'Henriette est une schématisation plus élaborée que celle de Rose : elle fait usage d'éléments de la schématisation de l'enseignant tout en déployant un raisonnement qui arrive à une réponse non conforme. Rose, par contre, présente une schématisation où la part de l'implicite est prépondérante, ce qui rend son analyse plus difficile.

Pour ces huit réponses ambiguës, un travail semble nécessaire pour reconstruire les points de vue des élèves.

Synthèse

En résumé, sur l'ensemble des réponses disponibles des élèves à l'item #1 :

— 9 (dont celle de Julianne) sont assimilables à la préconception anticipée par l'enseignant ;

— 6 sont assimilables à la réponse conforme au modèle enseigné ;

— 8 constituent autant d'incidents critiques, au sens où ces réponses résistent au diagnostic en deux catégories tel qu'il est proposé par l'enseignant.

6.3.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue

6.3.3.1 Schématisation de l'enseignant

L'item #1 est schématisé par l'enseignant lors de la phase 5 de la séquence, à l'occasion de son discours conclusif sur cet item, dont voici la transcription complète :

Transcription 1. Phase 5 - Correction de l'item #1 - Demi-classe B - 27 février - 00' à 04'

Enregistrements vidéo

E: alors (.) on pourra discuter (.) on va discuter donc heu (.) le questionnaire
qu- que je vous ai donné au début de l'année (.) au début du semestre (.) du premier
semestre (.) alors vous avez deux (.) objets qui ont (.) deux masses différentes
est-ce qu'ils tomberont bien sûr (.) donc vous avez la balle de tennis une boule
de pétanque et puis laquelle touchera bien sûr le sol la première (.) donc pour (.)
cette question (.) il y aura deux réponses qui sont justes (.) cela dépend (.) bien
sûr (.) si vous négligez les frottements (.) ou bien (.) si on prend (.) bien sûr (.)
les frottements (.) non nuls (.) dans le cas où les frottements (.) bien sûr (.) son
nuls ils arriveront (.) en même temps (.) même si les deux masses sont différentes

(.) bien sûr si vous prenez deux objets dans le vide (.) si vous prenez une feuille (.) ou bien une plume (.) une boule de pétanque (.) ils arriveront (.) en même temps (..) dans le cas où vous négligez (.) bien sûr pour vous vous aurez les frottements (.) bien sûr (.) la boule la plus lourd arrive (.) donc l'objet le plus lourd arrive le premier (.) avec une petite différence quelques millisecondes (.) bien sûr (.) plus tard (.) donc la première (.) premier objet (.) le plus lourd arrivera le premier (.) pourquoi ça? est-ce que quelqu'un a une idée? (...) Oui ?

Urs: la balle de tennis elle est plus sujette au frottement alors

E: oui (.) alors si vous prenez(.) si vous prenez les lois de Newton qu'est-ce qu'on avait vu dans les lois de Newton c'est la somme des forces (.) est égal à m a

((E écrit au tableau noir EF=mg))

Urs: et m étant plus petit ça va moins vite

E: alors (.) si vous prenez (.) p (.) si on néglige les frottements (.) a c'est plus (.) dans ce cas là c'est (.) c'est g (.) donc tout les objets sont (.) bien sûr (.) ont une accélération terrestre g (.) en tout cas là c'est ce qu'il se passe (.) si on néglige les frottements vous aurez les deux boules qui arrivent en même temps dans ce cas là on ne va pas tenir compte de (.) de la masse (...) est-ce que vous avez des questions par rapport à ça? (.) donc si on néglige (.) bien sûr (.) les frottements (.) ils arriveront (.) en même temps (.) dans ce cas la masse ne joue (.) aucun rôle (.) on va voir plus tard quand on prend (.) les deux voitures (.) quand on les lance en même temps avec la même force (.) ils arriveront pas (.) donc la première la plus (.) la plus légère (.) la plus légère arrivera la première (.) donc bien sûr si (.) en tenant (.) on va pas tenir compte de sa masse (.) qu'on appelle (.) la masse (.) liée à l'inertie pour le cas (.) quand on parle de la verticale (.) donc on a sur la verticale (.) horizontalement on va tenir compte mais verticalement on va pas tenir compte

Pendant son discours, l'enseignant laisse des traces au tableau noir, reproduites ci-dessous par la figure 6.9 [384].

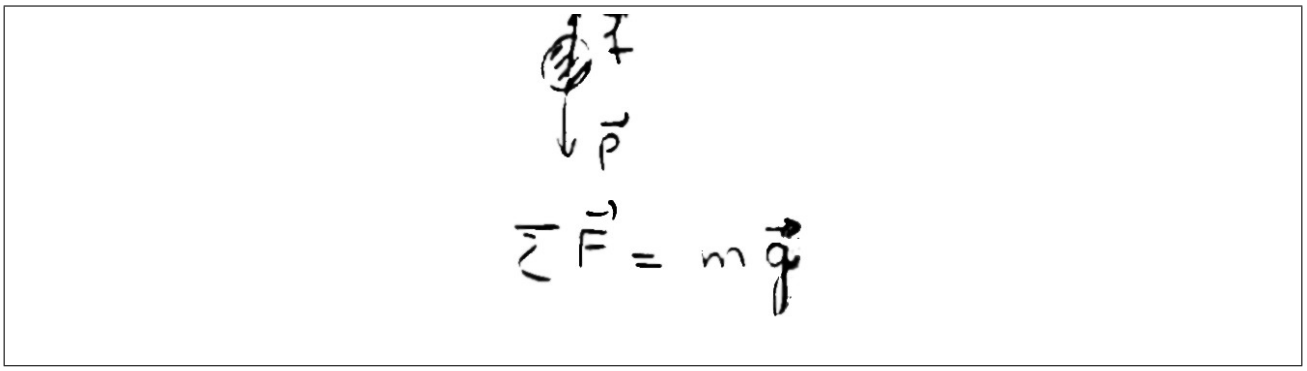


FIGURE 6.9 – Les traces inscrites au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de l'item #1 à la phase 5 de la séquence.

Le dessin comporte un disque pour représenter une balle, et deux flèches pour représenter les deux vecteurs des forces qui s'exercent sur la balle dans le cas de la chute, à savoir :

384. Les teintes noire et blanche ont été inversées pour faciliter la lecture.

— la force exercée par la Terre sur la balle (“$\overrightarrow{p}$” sur le dessin) ;

— la force exercée par l'air sur la balle (“$\overrightarrow{f}$” sur le dessin).

L'enseignant fait référence dans son discours à deux réponses conformes, l'une qui correspond à la réponse escomptée avant la séquence, et l'autre qui prend en compte le frottement. Cette deuxième réponse conforme est une accommodation de la schématisation de l'enseignant aux schématisations des élèves. L'enseignant a probablement constaté que de nombreux élèves considèrent le rôle du frottement dans leur réponse, et décide d'inclure cette alternative dans sa schématisation en fin de séquence. Or, le calcul algébrique se complexifie s'il tient compte les forces de frottement, ce que nous examinerons en détail plus loin, dans l'analyse des implicites à la situation (voir section 6.3.6.1, p. 442 et suivantes). Pourtant, dans son discours, l'enseignant ne donne que le résultat de la solution qui prend en compte le frottement, sans en développer le détail (notamment la résolution algébrique) qu'il ne fournit oralement que pour la réponse conforme escomptée. Il ne parle pas non plus du raisonnement qui conduit à la décision de négliger ou non le frottement, c'est-à-dire de l'analyse du système des interactions (au sens de Lemeignan & Weil-Barais, 1993).

6.3.3.2 Schématisations des élèves : leurs cheminements

Pour reconstruire les cheminements des élèves ayant fourni des réponses ambiguës, je propose de regrouper parmi les 8 réponses concernées celles qui sont cohérentes entre elles, de manière à combler avec les schématisations plus élaborées les implicites (probables) de celles qui le sont moins.

Voici pour rappel les 8 réponses ambiguës, que nous avons rangées ci-dessus dans la troisième catégorie :

Réponses ambiguës au pré-questionnaire - item #1

```
Cassandra: les deux balles toucheront le sol en même temps, car la force de gravité
           est la même
Henriette: la boule de pétanque car, bien qu'elle soit attirée par la même force vers
           le sol, sa masse étant plus grande elle tombera plus vite.
Ilona:     Elles arrivent en même temps. La force qui freine l'objet se fait en fonction de
           la masse
Laurie:    Elles toucheront le sol en même temps car c'est la même force de gravité
           qui agirait sur les deux balles
Ophélie:   les balles toucheront en même temps le sol. Car la même force est exécutée sur
           eux !
Sylvie:    la balle de tennis et la boule de pétanque subisse la même force d'apesanteur
           donc elle tomberont en même temps par terre
Xavier:    oui car g et le frottement de l'air sont égaler
Rose:      la boule de pétanque, car sa masse est supérieure
```

À partir de ces huit réponses, je tenterai de décrire trois cheminements de pensée qui redonnent une cohérence aux schématisations de ces élèves, tout en visant à l'économie des points de vue décrits. Lorsque plusieurs réponses d'élèves sont regroupées autour de la reconstruction d'un seul cheminement,

je discuterai également de la validité de ce regroupement, toujours en soumettant mes interprétations au critère de cohérence, et en utilisant comme référence le modèle de physique enseigné. La question de savoir si les réponses des élèves indiquent une éventuelle situation de malentendu se posera ensuite indépendamment pour chaque cheminement reconstruit.

Premier cheminement : *de {même force} à diverses réponses*

Les réponses de Cassandra, Henriette, Laurie, Ophélie et Sylvie contiennent toutes l'expression "même force" dans la justification, quelque soit la réponse à la question. Je vais donc examiner si ces réponses permettent d'identifier un cheminement de pensée spécifique, relativement à l'usage particulier d'un objet de discours : la classe-objet {même force}. Il s'agit dans un premier temps d'examiner si l'usage particulier de cette classe-objet permet de comprendre la cohérence des réponses fournies par ces élèves. Il s'agira ensuite, dans la prochaine section, d'examiner si cette classe-objet est utilisée dans la schématisation de l'enseignant comme dans celle des élèves, ou si elle correspond à une ou plusieurs autre(s) classe(s)-objet(s) schématisée(s) par l'enseignant, qui divergent de celle utilisée par ces élèves. Dans ce dernier cas, je ferai alors l'hypothèse qu'il y a situation de malentendu, conformément à la définition des situations de malentendu proposée au chapitre 3.4.1 (p. 222).

Examinons à présent en détail l'usage que font de Cassandra, Henriette, Laurie, Ophélie et Sylvie de la classe-objet {même force}.

La classe-objet {même force} peut faire référence à une comparaison des valeurs scalaires d'une force exercée sur les deux balles, ou éventuellement de valeurs scalaires des sommes des forces exercées [385] sur les deux balles. La première question qui se pose est de savoir si ces élèves font référence à une même (somme des) forces avec cette classe-objet, question de savoir si cet objet de discours est commun aux cinq réponses des élèves.

Selon les traces à disposition, ces élèves semblent faire un même usage de cette classe-objet, usage qui consiste à désigner une force, et à considérer qu'elle serait la "même" pour les deux objets en chute libre. J'observe :

— deux usages de {même force}, par Henriette et Ophélie ;

— deux usages de {même force de gravité}, par Cassandra et Laurie ;

— un usage de {même force d'apesanteur [386]}, par Sylvie.

À quelle force ces élèves font-ils référence ? S'agit-il d'une force de même nature pour ces élèves ? Je vais examiner si l'hypothèse d'une référence commune à la force de gravitation exercée sur les balles par la Terre résiste à une analyse détaillée.

385. La somme des forces est parfois désignée par un singulier, comme par exemple par le terme "force résultante".
386. Il s'agit probablement ici de dénoter la pesanteur pour l'élève, dont l'orthographe est confuse en raison de l'article *la* devant *pesanteur* dont l'usage à l'oral a été reçu par Sylvie comme *l'apesanteur* au lieu de *la pesanteur*.

Henriette utilise la classe-objet {même force} à la deuxième place du prédicat $\pm attirer$ (•, •)[387], c'est-à-dire $\pm attirer$ (vers le sol, par la même force). À partir de cette indice, je fais l'hypothèse qu'elle désigne bien la force de gravitation par la classe-objet {même force}. Cassandra utilise la classe-objet {même force de gravité}, qui énonce clairement qu'il s'agit de la force de gravitation. Ophélie utilise le terme de {même force} à la première place du prédicat $\pm être\ exécuté$ (sur •, par •) en parlant des balles, ce qui permet également de faire l'hypothèse qu'elle désigne la force de gravitation.

L'hypothèse qu'il s'agit du même objet de discours chez ces cinq élèves permet la reconstruction d'un point de vue partagé par ces élèves, qui consiste à affirmer l'égalité des valeurs scalaires des forces de gravitation exercées sur les deux balles. Or, les forces de gravitation exercées sur les balles à l'item#1 ne sont pas de même valeur selon le modèle enseigné, puisqu'elles sont proportionnelles aux masses des balles, selon la loi de la force de gravitation (voir p. 381). En conséquence, les réponses utilisant {même force} pourraient être considérées non conformes aux savoirs enseignés. En effet, introduire l'objet de discours {même force} pour répondre à l'item #1 aurait dû conduire ces élèves à donner la boule de pétanque comme étant la première à toucher le sol. Or, ces élèves arrivent à une réponse conforme à la schématisation de l'enseignant, à savoir que les deux balles touchent le sol simultanément, à l'exception de Henriette qui donne la boule de pétanque première mais pour d'autres raisons, sur lesquelles nous reviendrons. Il y a donc peut-être une situation de malentendu autour de {même force} pour ces élèves, et nous tenterons d'examiner cette hypothèse à la section suivante (section 6.3.4.1, p. 423), en analysant s'il y a divergence entre les points de vue des élèves et celui de l'enseignant concernant cette classe-objet.

Avant d'analyser plus précisément le sens que ces élèves donnent à la classe-objet {même force}, nous pouvons déjà proposer une description minimale du cheminement des élèves au cours de leur schématisation, en définissant (1) son point d'origine, à savoir la référence à un objet de discours {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur}, et (2) son point d'arrivée, à savoir la réponse que les deux balles arrivent au sol en même temps ou, alternativement pour Henriette, que la boule de pétanque arrive au sol en premier. La figure 6.10 (p. 419) représente schématiquement ce cheminement principal, et l'alternative de Henriette.

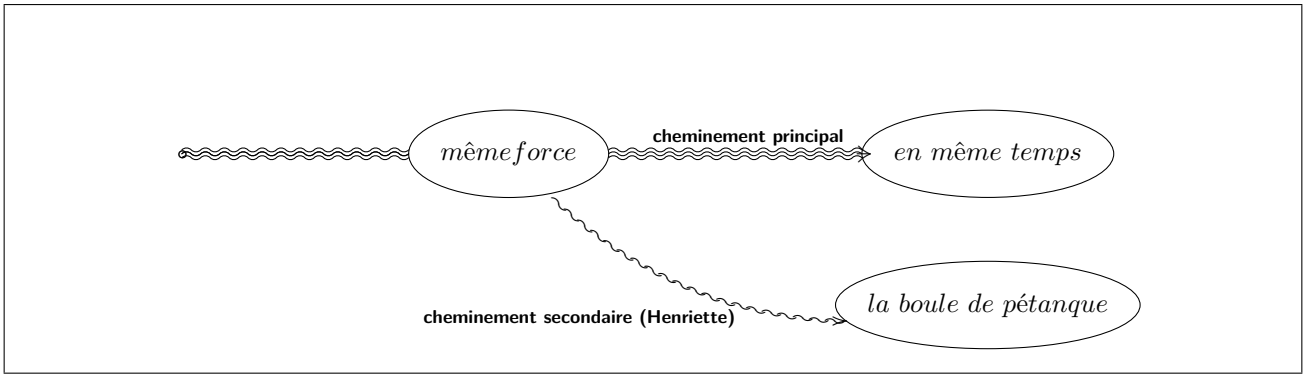


FIGURE 6.10 – Représentation schématique et partielle du cheminement #1, situation de malentendu #2.

387. Les symboles utilisés sont regroupés dans la légende fournie en annexe, section 3.3.6.2, p. 211

Ce schéma est délibérément partiel et minimal, pour ne représenter que ce qui a de commun aux élèves qui utilisent l'expression "même force" dans leur réponse. Une représentation plus précise, à l'aide de la logique naturelle, est disponible en annexe (p. 974).

Avant d'examiner l'hypothèse d'une situation de malentendu quant à ce cheminement, je présente ci-dessous les autres cheminements, ceux d'Ilona, Rose et Xavier.

Deuxième cheminement : *de {frottement, force qui freine} à une chute simultanée*

Ilona et Xavier donnent les deux balles en même temps, c'est-à-dire la réponse conforme aux savoirs enseignés. Ces deux élèves produisent néanmoins une justification autour de la notion de |FROTTEMENT| avec les classes-objets {force qui freine l'objet} et {frottement de l'air} (voir la transcription p. 417, lignes 5 et 13), qui ne correspond ni à la réponse conforme ni à la difficulté escomptée. Je propose ci-dessous une reconstruction des étapes implicites des schématisations d'Ilona et Xavier, que j'assimile à un même cheminement en raison des similitudes que je viens de citer.

Ilona se focalise exclusivement sur la force de frottement pour justifier sa réponse, faisant dépendre celle-ci de la masse. Pourtant, si elle ne prend en compte que la force de frottement exercée sur les deux balles dans son raisonnement, comment arrive-t-elle à la conclusion que les deux balles "arrivent en même temps" ? Il y a ici visiblement une part implicite à la schématisation d'Ilona, puisque la prise en compte des forces de frottement dans le calcul devrait conduire, conformément aux savoirs enseignés, à conclure que la boule de pétanque arrive en premier (voir p. 442 et suivantes). Peut-être que la réponse de Xavier suggère une piste pour reconstituer cette partie implicite de son cheminement de pensée.

Le discours de Xavier comprend une erreur orthographique qui peut être source d'ambiguïté quant au sens à donner à son propos. Xavier écrit "égaler" soit (1) au lieu de *égaux*[388] de l'adjectif *égal*, soit (2) au lieu de *égalés*, du verbe *égaler* au participe passé, qui est moins courant dans l'usage, mais constitue une erreur orthographique fréquemment rencontrée chez les francophones.

Selon l'hypothèse retenue, la schématisation de Xavier fournit une justification différente de l'égalité entre les deux balles, soit :

1. Xavier considère le "frottement de l'air" et "g" identiques pour les deux balles, et par conséquent elles chuteraient à la même vitesse.
2. Xavier considère qu'il y a une sorte de compensation entre "le frottement de l'air" et "g", "g" étant compris ici comme désignant la force de gravitation ou éventuellement son effet sur l'accélération.

Dans la première hypothèse, Xavier établit une force de frottement "identique" pour les deux balles. La signification de g de son point de vue est plus difficile à établir. En effet, aucune des deux hypothèses ne permet d'attribuer à Xavier un usage de g comme désignant l'accélération des objets en chute libre,

388. Cette erreur, qui peut paraît surprenante pour un-e francophone, se rencontre chez des allophones de langues latines.

puisque cette accélération résulterait de la somme des forces, elle ne pourrait donc pas être directement comparée à la force de frottement exercée sur la balle, que ce soit pour déterminer qu'elles sont égales ou pour établir que leurs effets sont compensés.

Dans la deuxième hypothèse, Xavier articule dans sa schématisation le frottement et g dans un raisonnement compensatoire qui établit un équilibre entre la force de frottement exercée sur les balles et g, probablement utilisé ici comme désignant la force de gravitation. En effet, si l'on considère que Xavier serait d'accord avec Ilona pour dire que la force de frottement dépend de la masse sur laquelle elle s'exerce, et que conformément au modèle enseigné la force de gravitation dépend elle aussi de la masse mais dans un rapport inverse, une grossière simplification fréquente dans le raisonnement naturel en physique [389] consiste à établir une compensation entre les deux effets contraires, quand bien même aucune vérification quantitative ne permet d'argumenter cette compensation.

Complétées ainsi, les schématisations d'Ilona et Xavier paraissent non seulement cohérentes pour elles-mêmes, mais aussi complémentaires entre elles : elles expriment toutes les deux cette idée que deux forces s'exercent sur les balles, l'une étant plus importante pour la balle de plus grande masse (la force de gravitation), et l'autre étant plus importante pour la balle de plus petite masse (la force de frottement) et que, partant, les sommes des forces exercées sur les deux balles sont identiques et que les balles arrivent en même temps au sol. La figure 6.11 (p. 421) représente schématiquement le cheminement d'Ilona et Xavier, en retenant pour la réponse de ce dernier uniquement l'hypothèse (2) concernant "égaler".

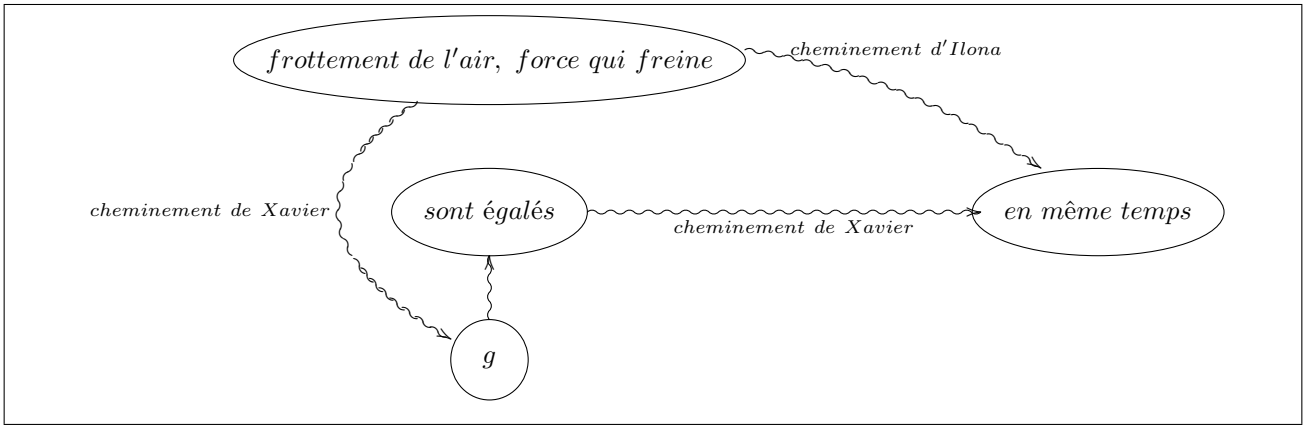


FIGURE 6.11 – Représentation schématique et partielle du cheminement #2, situation de malentendu #2.

Ce schéma est délibérément partiel, de manière à représenter le plus simplement possible le cheminement de ces deux élèves, dont l'un apparaît le raccourci de l'autre. La représentation plus précise et plus complète qui a permis de le construire, fait usage des outils d'analyse de la logique naturelle ; elle est disponible en annexe (p. 976).

Le cheminement ainsi reconstitué de ces deux élèves repose sur un modèle physique conforme aux savoirs enseignés, mais établit implicitement, et sans vérification quantitative, une compensation entre les

389. Inhelder et Plaget décrivent de nombreux raisonnements de ce genre dans leurs travaux empiriques sur le monde physique chez les enfants, voir par ex. Inhelder et Piaget (1955).

effets des forces de frottement et de gravitation. De plus, l'usage de {g} par Xavier diffère probablement de celui qu'en fait l'enseignant dans sa schématisation. Sur ce point, la comparaison entre le cheminement des élèves et la schématisation de l'enseignant fait peut-être apparaître une situation de malentendu. J'examinerai cette question à la section 6.3.4.2 (p. 427), dans la limites des possibilités laissées par les traces de ces réponses.

Troisième cheminement : *de {masse} à la boule de pétanque première*

Nous avons vu que l'usage de {masse} par Rose dans sa réponse empêche de la classer parmi les réponses non conformes escomptées par l'enseignant et attribuée à la préconception courante. En effet, cette préconception consiste à attribuer une plus grande vitesse à une balle plus *lourde*. Cette notion du sens commun, la *lourdeur*, ne différencie justement pas le *poids* - qui est une *force* selon les savoirs enseignés - et la *masse* - une propriété des objets, toujours selon les savoirs enseignés - et regroupe dans une même notion une *force* exercée sur l'objet et une *propriété* de l'objet. Pour que j'assimile la réponse de Rose aux réponses non conformes, je devrais faire l'hypothèse d'une situation de malentendu qui consiste, pour Rose, à utiliser {masse} en lieu et place de |lourdeur|, éventuellement de {poids}, ou encore à utiliser une classe-objet indifférenciée {masse, poids}. Mais ce n'est pas la seule possibilité : Rose a peut-être cheminé par un intermédiaire implicite, qui lui a permis de conclure à l'accélération supérieure de la boule de pétanque en partant effectivement de la différence des masses entre les deux objets. La figure 6.12 (p. 422) ci-dessous représente schématiquement cette alternative, encore ouverte à cette étape de l'enquête, quant au cheminement de Rose :

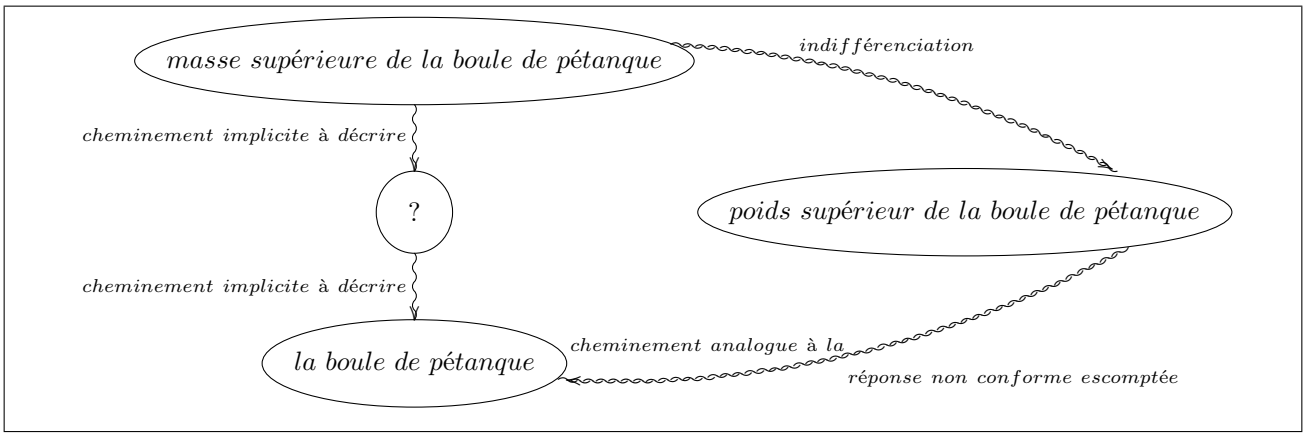


FIGURE 6.12 – Représentation schématique et partielle du cheminement #2, situation de malentendu #2.

Le point de vue de Rose est particulièrement difficile à reconstruire. Une enquête me paraît indispensable. J'en discuterai à la section 6.3.4.3.

6.3.4 Enquête quant à une ou plusieurs situations de malentendu

6.3.4.1 Enquête quant à une situation de malentendu pour le premier cheminement : *de {même force} à diverses réponses*

Il s'agit à présent de procéder à l'analyse de l'usage de la classe-objet {même force} par Cassandra, Henriette, Laurie, Ophélie et Sylvie, de manière à confronter cet usage à la schématisation de l'enseignant. Selon le résultat auquel nous conduit cette analyse, c'est-à-dire selon que cette reconstruction permet ou non de décrire une divergence entre les schématisations de l'enseignant et celle des réponses des élèves, je défendrai l'hypothèse d'une situation de malentendu. Pour ce cheminement, je ne présente qu'une seule hypothèse, n'ayant pas trouvé d'autres interprétations cohérentes des traces laissées par les élèves que celle-ci.

Première hypothèse : *reprise indifférenciée par les élèves de deux classes-objets de l'enseignant*

Ces élèves utilisent lors de leur schématisation une classe-objet commune, {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur}, dont l'introduction dans le discours peut être considérée comme une opération d'ancrage α (Grize, 1996). Formuler cette opération d'ancrage nécessite de la part du chercheur une hypothèse concernant la notion primitive à partir de laquelle les locuteurs introduisent un nouvel objet de discours. La recherche de cette notion primitive est ce qui m'a permis, lors de cette analyse, d'identifier ce sur quoi porte le malentendu.

Pour trouver dans la schématisation de l'enseignant ce qui pouvait être à l'origine de la classe-objet {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} utilisée par ces élèves, j'ai observé son usage de l'adjectif "même". Ces observations m'ont conduit à postuler une notion primitive |CONSTANTE|, induite par l'importance que l'enseignant donne à cette notion dans son discours et les tâches transmises aux élèves. Ce n'est pas tant l'usage fréquent d'une classe-objet {constante} dans la schématisation de l'enseignant qui lui permet d'insister sur cette notion, mais plutôt la répétition du signifiant "g" d'une manière qui implique qu'il s'agit d'une *constante*, et surtout la place prépondérante que prend cette valeur dans les savoirs enseignés. Ces observations du contexte dans lequel se construisent les schématisations des élèves, me permet de compléter l'opération d'ancrage comme suit :

α_1 : |CONSTANTE| $\Rightarrow$ {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur}

La formulation de cette opération énonce la transformation effectuée dans la schématisation lorsque les élèves choisissent des termes pour dénoter un objet de discours, ou pour désigner un référent à travers un objet de discours. Cela me permet de montrer [390] que la dénotation et la désignation ne fonctionne pas de la même manière dans la schématisation de l'enseignant relative à cette notion primitive. L'opération de la schématisation de l'enseignant procédant de la même notion primitive |CONSTANTE| s'écrirait :

390. Le verbe *montrer* est utilisé ici délibérément, au sens où Grize (1998) l'analyse, puisque le scientifique ne fait que construire, lui aussi, une schématisation, et son argumentation consiste bien davantage à *donner à voir* qu'à démontrer, au sens déductif du terme.

α_2 : |CONSTANTE| ⇒ {accélération constante, g, $9.81\,\frac{m}{s^2}$} [a]

a. Dans le but de simplifier la présentation, j'ai uniquement mis dans ces classes-objets les éléments minimaux pour énoncer la divergence et non pas l'ensemble des termes utilisés par l'enseignant à l'oral et sur les feuilles d'exercice tout au long de la séquence. La reconstitution de cette classe-objet se base sur les documents reproduits dans les figures B.31 et B.32 (p. 831 et p. 838).

Du point de vue de l'enseignant, le signifiant "g" dénote une *accélération*, et non une *force* : il ne s'agit donc pas de la "force de gravité" (Cassandra et Ophélie) ni de la "force d'apesanteur" (Sylvie), mais bien de l'*accélération* qui en résulte selon la loi de la somme des forces et en faisant abstraction des forces de frottements et d'autres facteurs d'influence de faible intensité.

Du point de vue des élèves, par contre, le signifiant "g" dénote une *force*, si l'expression "même force" des cinq élèves identifiés fait effectivement référence à la notion |CONSTANTE|. À partir de là, il est possible d'établir la divergence entre la classe-objet proposée par l'enseignant et celle utilisée par Cassandra, Henriette, Laurie, Ophélie et Sylvie. D'une part, la classe-objet {force de gravité} dans le discours de l'enseignant (et ses supports de cours) ne contient pas {même force} ni une quelconque notion |CONSTANTE|. La force de gravité est proportionnelle à la masse, sa valeur est différente pour des masses différentes comme c'est le cas pour la question posée à l'item #1. D'autre part, la notion |CONSTANTE| se retrouve, du point de vue de l'enseignant, dans les classes-objets relatives à l'accélération ou à la vitesse des objets en chute libre. À l'écrit, c'est surtout l'accélération dont le signifiant "g" est associée à cette notion |CONSTANTE| et dont la valeur est définie dans le polycopié de cours comme étant de 9.81 m/s^2. Dans le discours, l'enseignant fait parfois référence aux objets qui tombent "à la même vitesse" (discours oral de l'enseignant). L'adjectif "même", dans la schématisation de l'enseignant de l'item #1 se rapporte donc soit à l'accélération, soit à la vitesse de chute des balles.

Énonciation des opérations logico-discursives divergentes selon les points de vue

Tentons à présent de décrire le plus précisément possible ce sur quoi porte le malentendu.

La classe-objet {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} construite par les élèves peut être considérée, dans la situation d'interlocution, comme une reprise (une opération θ) de la classe-objet {force de gravitation} utilisée dans la schématisation de l'enseignant (voir par exemple le discours écrit du polycopié distribué, figure B.32, 838). En effet, cette classe-objet fait partie du modèle enseigné de physique newtonienne et fonctionne comme un sujet de conversation parmi les principaux sujets de ce cours de physique. Cependant, dans ce cas, ce sont les usages par les élèves de l'adjectif "même" qui divergeraient de la schématisation de l'enseignant.

Nous pouvons faire l'hypothèse que la classe-objet {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} fonctionne, selon le point de vue de ces élèves, comme une reprise indifférenciée de la classe-objet {force gravitationnelle} et de la notion primitive |CONSTANTE|, qui sont toutes les deux présentes

dans la schématisation de l'enseignant [391]. Cette indifférenciation peut provenir du fait qu'il n'y a, du point de vue des élèves, aucune utilité pragmatique à faire la différence entre les deux objets de discours pour répondre à la question posée. En effet, la force gravitationnelle exercée sur les objets en chute libre et leur accélération constante vont dans le même sens (vers le centre de gravité de la Terre), et la première est généralement perçue comme une cause de la seconde. Par analogie avec le raisonnement cinématique qui permet de ne discuter que l'accélération sans déterminer la vitesse, dans cette situation de chute libre les élèves discutent de la force sans déterminer l'accélération. Cependant, ce raisonnement n'est pas valable dans le modèle enseigné (voir section 6.3.6.1, p. 442).

En faveur de cette hypothèse, j'observe que quatre de ces cinq élèves donnent à l'item #1 une réponse conforme aux savoirs enseignés en utilisant cette classe-objet (les réponses de Cassandra, Laurie, Ophélie et Sylvie), *sans* différencier *force de gravitation* et *accélération constante* en deux classes-objet distinctes. Par contre, le raisonnement de leur schématisation n'est pas conforme, puisque le modèle enseigné utilise non seulement la loi de la force de gravitation (voir section 6.1.2, p. 381), mais aussi la loi de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a}$, voir section 6.1.2, p. 381) pour déterminer l'accélération (que ce soit $\overrightarrow{g}$ ou un $\overrightarrow{a}$ quelconque) à partir de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F}$) : traiter une force de gravitation et l'accélération résultante de l'exercice de cette force de manière indifférenciée n'est donc pas conforme aux savoirs enseignés.

Henriette, par contre, donne la boule de pétanque première. De son point de vue, la classe-objet {même force} est réinvestie dans un raisonnement faisant intervenir la loi de la force de gravitation ($F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$, voir section 6.1.2, p. 381), au moins de manière grossière en considérant l'influence de la masse pour déterminer la valeur de la force de gravitation exercée sur un objet en chute libre. Si la classe-objet paraît semblable à celle utilisée par Cassandra, Laurie, Ophélie et Sylvie, l'indifférenciation ne provient pas ici d'une résolution de l'exercice uniquement avec les forces ou ne faisant pas la différence entre force et accélération, puisque Henriette organise {même force} en opposition (τ : $\xrightarrow{bien\ que}$) à la {masse} et à la vitesse de chute (η : $\pm$tomber plus vite). Tout se passe donc pour Henriette comme si elle reprenait cet objet de discours, la classe-objet collective indifférenciée {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur}, pour l'utiliser dans un raisonnement conforme au modèle enseigné pour déterminer la valeur de la force de gravitation, mais qui produit ainsi une réponse non conforme du fait qu'elle omet l'étape faisant usage de la loi de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a}$ [392]. Le terme "même" n'a peut-être pas le même sens pour Henriette que pour les autres élèves, et s'apparente probablement plutôt à l'idée d'un *même type* de force - une force *de gravitation* - qu'à l'idée d'une force de *même valeur*, puisqu'elle

391. J'ai choisi de considérer cette idée de constante plutôt comme une notion primitive que comme une classe-objet, car elle est communiquée aux élèves notamment par l'adjectif "même" et à travers des usages et observations lors d'exercices, de telle sorte que la classe-objet {constante} n'est pas explicitement mentionnée dans le discours (ou du moins très rarement car je ne peux exclure que son usage ait échappé à mes observations). Il s'agit ici d'une limite du travail effectué, puisque il aurait fallu faire une analyse complète des classes-objets utilisées par l'enseignant dans tous le corpus pour pouvoir décider avec plus de rigueur. Néanmoins, même dans ce cas, il est pratiquement impossible de savoir si, pour un-e élève en particulier, il y a reprise d'un terme énoncé verbalement par l'enseignant ou choix d'un mot à partir d'une notion primitive acquise en constatant, lors d'exercice, la constance d'une valeur.

392. La force exercée sur les objets par la Terre est directement proportionnelle à la masse des objets en question, et c'est le résultat d'une simplification par la masse qui intervient au moment de déterminer l'accélération qui permet d'extraire une *constante* (voir section sur la résolution algébrique, p. 442).

fait implicitement référence, dans sa justification, à des forces de gravitation de valeurs différentes pour les deux balles. Les autres élèves (Cassandra, Laurie, Ophélie et Sylvie) produisent la réponse conforme au modèle en utilisant la classe-objet indifférenciée dans un raisonnement lacunaire qui ne fait pas la différence entre force et accélération quand les élèves énoncent que la force de gravitation exercée sur les deux balles est de même valeur : dans leur cheminement, c'est l'ensemble indifférenciée *force et accélération* qui est considéré constant, "le même". Cela permet à ces élèves de s'ancrer dans le discours de l'enseignant, qui ressasse cette idée de "constance", que l'enseignant utilise cependant spécifiquement en référence à g.

Henriette produit une réponse non conforme au modèle en utilisant la classe-objet indifférenciée - elle ne fait peut-être pas la différence entre force et accélération ou au moins omet l'étape qui détermine l'accélération des objets - mais elle n'énonce pas que les forces de gravitation exercées sur les balles sont de valeurs identiques. Cette nuance conduit Henriette à donner une autre réponse, conforme au discours enseignant sur les chutes non libres (avec frottement), où les objets plus massifs "tombent plus vites".

Sur la base de ces hypothèses, nous sommes désormais en mesure de compléter la représentation schématique de ce cheminement (voir figure 6.13 ci-dessous), avec l'opération τ de Henriette et sa référence implicite (entre crochets sur la figure) à $\overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a}$.

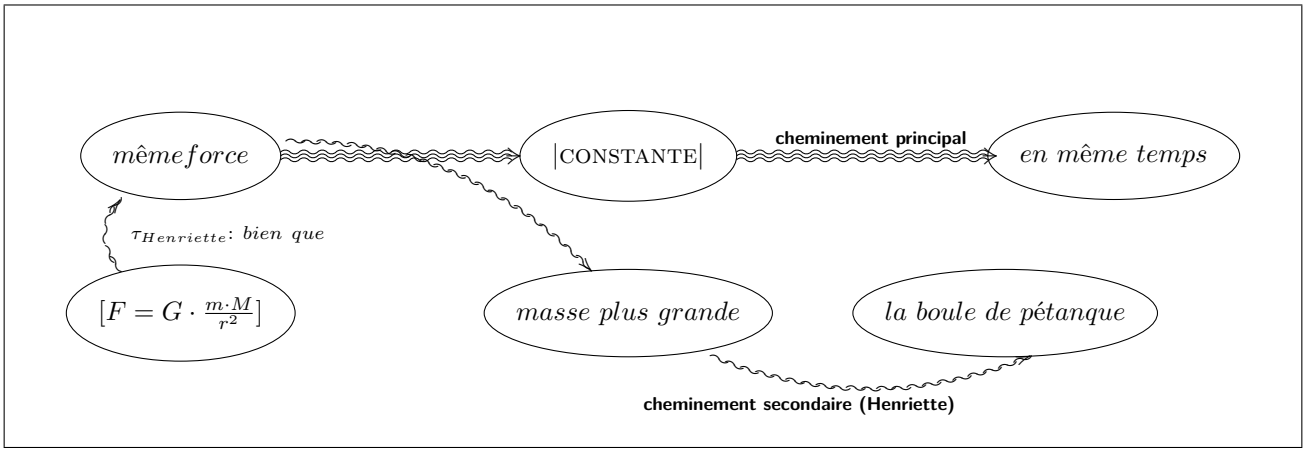


FIGURE 6.13 – Représentation schématique complétée du cheminement #1, situation de malentendu #2.

Pour l'ensemble des élèves impliqués, ce cheminement a en commun de ne pas faire la différence entre force et accélération dans la résolution du problème. C'est néanmoins l'élève (Henriette) qui donne la réponse la plus proche de la difficulté escomptée par l'enseignant qui, en fait, tente de différencier la classe-objet {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} en ajoutant dans son organisation raisonnée un lien entre la masse et le fait de tomber plus vite : "sa masse étant plus grande elle tombera plus vite". Malgré les apparences, son cheminement est plus proche d'une réponse conforme au modèle enseigné, puisque Henriette fait implicitement référence à des valeurs différentes pour un même type de force, la force de gravitation. Tout en restant inachevée, sa schématisation va au-delà de celles des quatre autres élèves. Considérer que ces élèves utilisent une classe-objet indifférenciée {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} permet de rétablir la pertinence de leurs réponses de leur point de vue et de montrer pourquoi cette pertinence n'est pas aisément reconnue par l'enseignant dans l'interlocution

et apparaît facilement à ce moment-là comme un raisonnement non conforme au modèle enseigné dans cette classe.

Je peux donc décrire ce sur quoi porte le malentendu par une divergence quant aux classes-objets utilisées dans la schématisation de l'enseignant et celle des cinq élèves concernés. À la classe-objet unique de la schématisation des cinq élèves correspondent au moins deux classes-objets distinctes dans la schématisation de l'enseignant :

— classe-objet des cinq élèves : $\boxed{1}$ {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} ;

— classes-objets de l'enseignant [393] : $\boxed{1}$ {force de gravitation} $\boxed{2}$ {accélération constante, g, $9.81\frac{m}{s^2}$}.

Au vu de ce qui précède, c'est la classe-objet elle-même qui est le lieu du malentendu. Cette analyse permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu, car l'hypothèse de la divergence quant aux classes-objets selon les points de vue décrite ci-dessus permet (1) de rétablir la cohérence des points de vue des élèves et (2) de montrer que leurs réponses procèdent de la schématisation de l'enseignant [394], tout en s'éloignant de manière significative des savoirs enseignés.

Considérer cette situation *de malentendu* n'empêche pas que d'autres sources de difficulté se mêlent à sa genèse, par exemple la double difficulté proprioceptive relative au fait que (1) l'accélération est généralement plus difficile à sentir que la force, et (2) à l'exception justement de la force de gravitation que nous ne sentons pas *constamment* s'exercer sur nous.

Il nous reste à examiner les réponses de Ilona, Rose et Xavier. Participent-elles de la situation de malentendu autour de la classe-objet {même force} ?

6.3.4.2 Enquête quant à une situation de malentendu pour le deuxième cheminement : *de {frottement, force qui freine} à une chute simultanée*

Examinons les réponses d'Ilona et Xavier (voir p. 417). Je propose deux hypothèses quant à la divergence entre les schématisations d'Ilona et Xavier et celle de l'enseignant.

Première hypothèse : *une force de frottement égale pour les deux balles*

La première consiste à attribuer à Xavier une schématisation du "frottement de l'air" qui ne correspond pas à la manière conventionnelle de traiter des forces de frottement dans un cas comme celui-ci.

393. Dans le but de simplifier la présentation, j'ai uniquement mis dans ces classes-objets les éléments minimaux pour énoncer la divergence et non pas l'ensemble des termes utilisés par l'enseignant à l'oral et sur les feuilles d'exercice tout au long de la séquence. La reconstitution de cette classe-objet se base sur les documents reproduits dans les figures B.31 et B.32 (p. 831 et p. 838).

394. Au sens où les schématisations des élèves s'ancrent dans une notion amenée par l'enseignant, et qu'elles reprennent partiellement les composants de sa schématisation.

Cette première hypothèse repose sur l'interprétation (1) du terme "égaler" dans la réponse de Xavier, c'est-à-dire en lui donnant la valeur d'un adjectif. Selon cette hypothèse, Xavier considérerait les force de frottement exercées sur les deux balles "égales", à l'instar de ce qu'il dit de g. Dans cette hypothèse, g dénote pour Xavier des forces de gravitation exercées sur la balle qu'il qualifie d'"égales". Les forces de frottement et de gravitation exercées sur les deux balles étant "égales", il pourrait en conclure que les deux balles arrivent en même temps.

Cette schématisation ferait usage d'un modèle non conforme du frottement, puisque l'intensité du frottement dépend dans le modèle enseigné de la masse des objets (entre autres), selon le *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985) à disposition des élèves. Néanmoins, je manque de données pour discuter plus précisément d'une situation de malentendu, car les interventions de l'enseignant au sujet du $|\text{FROTTEMENT}|$ sont trop peu développées pour pouvoir soutenir l'hypothèse d'une reprise par Xavier d'éléments de la schématisation de l'enseignant. Il s'agit plutôt d'une situation où l'élève s'aventure à raisonner sur un objet qui ne fait pas partie des savoirs enseignés, sans disposer d'une schématisation offerte par l'enseignant qu'il pourrait mobiliser comme ressource.

Cette hypothèse ne fonctionne pas pour rendre compte de la schématisation d'Ilona (Ilona écrit "la force qui freine l'objet se fait en fonction de la masse"), puisque celle-ci met implicitement en jeu des forces de frottement inégales pour les deux balles.

Seconde hypothèse : *une compensation des effets du frottement et de* g

La seconde hypothèse consiste à attribuer à Ilona et Xavier un raisonnement implicite commun qui fait compenser cette "force qui freine l'objet", qu'Ilona dit être "en fonction de la masse", par une force de gravitation dont l'intensité dépend également de la masse de l'objet, dénotée par le signifiant "g"par Xavier. Ce raisonnement implicite est conforme au modèle enseigné pour ce qui est des deux forces exercées sur les balles : la force de gravitation s'exerce sur la balle en direction du sol, et la force de frottement en direction opposée. Ce qui n'est pas conforme au modèle enseigné, c'est d'une part l'idée d'une compensation *exacte* entre l'effet de la force de gravitation en fonction de la masse de l'objet et l'effet de la force qui freine, et d'autre part la désignation de la force de gravitation par "g", qui désigne une accélération dans le modèle enseigné.

Selon cette hypothèse, la schématisation d'Ilona et Xavier diffère de celle de l'enseignant pour s'être arrêtée à l'examen de l'intensité des forces exercées sur la balle, sans s'intéresser à l'effet de ces forces sur l'accélération des balles dans le sens du mouvement de chute. Leur schématisation n'aurait pas été suffisamment construite pour intégrer le rôle que joue également la masse de l'objet lorsqu'il s'agit de déterminer l'accélération de l'objet en chute libre à partir de la loi de la somme des forces (voir section 6.3.6.1, p. 442). Autrement dit, ils auraient "oublié" de considérer m dans l'expression mathématique de cette loi ($F = m \cdot a$). Dans ce cas, c'est plutôt un raisonnement incomplet, inachevé, qui rend compte des réponses d'Ilona et Xavier.

Cette seconde hypothèse me parait plus convaincante, parce qu'elle permet de rendre compte des schématisations d'Ilona et de Xavier. L'organisation de la schématisation sous la forme d'une compensation constitue une divergence avec la schématisation de l'enseignant, mais ne peut être considérée comme une situation de malentendu, car il ne s'agit pas ici d'une reprise de la schématisation de l'enseignant. Peut-être les élèves ont-ils opéré selon un mode de raisonnement plus simple, tel qu'il a été observé dans les travaux de recherche portant sur le développement cognitif de l'enfant.

Corollaire à la seconde hypothèse : interaction entre le premier et le deuxième cheminement

L'hypothèse d'un raisonnement compensatoire entre les effets du frottement et de g pour Xavier, exposée ci-dessus, nous a conduit à proposer un usage de g qui rappelle le premier cheminement discuté ci-dessus pour Cassandra, Henriette, Laurie, Ophélie et Sylvie, intitulé *de {même force} à diverses réponses*.

Xavier semble utiliser le signifiant "g" pour dénoter la force de gravitation. Participe-t-il à la situation de malentendu autour de la classe-objet indifférenciée {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} ? La brève réponse écrite de Xavier à l'item #1 ne permet pas de trancher définitivement. Elle fournit néanmoins un argument en faveur d'une fusion entre *force de gravitation*, d'une part, et *g, accélération constante des objets en chute libre*, d'autre part. Cet indice repose sur la construction syntaxique de la réponse de Xavier, qui met "g" et "le frottement" dans une énumération, à l'aide du connecteur "et[395]. En logique naturelle, l'opération d'organisation raisonnée τ : $\xrightarrow{et}$ effectuée par Xavier pourrait être comprise comme une organisation logique équivalente à une somme des forces ($\sum \overrightarrow{F}$), faisant usage du signifiant "g" en tant que *force*.

Dans les autres réponses de Xavier au pré-questionnaire, la même énumération se répète, indiquant qu'il ne s'agit pas ici d'un accident d'écriture : à la réponse de Xavier à l'item #2, Xavier écrit pour l'une des postures "une force sera créée (pression/impulsion[dessin]), donc g+f. Le poids de l'homme augmentera. (c>a)". Cet exemple est particulièrement éloquent, puisque Xavier utilise même le signifiant "+" emprunté au langage mathématique, pour additionner "g" à "f", qui dénote alors clairement une *force*. Dans sa réponse à l'item #6, Xavier écrit "celle de pétanque, car le poids+g sera plus grande que celle de tennis". Dans cet exemple, Xavier additionne à nouveau "g" avec une *force* (le "poids").

6.3.4.3 Enquête quant à une situation de malentendu pour le troisième cheminement : *de {masse} à la boule de pétanque première*

Concernant la réponse de Rose ("la boule de pétanque, car sa masse est supérieure"), nous avons vu qu'elle ne pouvait pas être assimilée à une réponse escomptée par l'enseignant parce qu'elle contient la classe-objet {masse}. Pris dans son sens conforme aux savoirs enseignés, la {masse} n'est justement pas

395. Mettre sur le même plan syntaxique deux mots de registres sémantiques différents, l'un ("g") de la catégorie des accélérations et l'autre ("frottement") de la catégorie des forces, reviendrait sinon à effectuer une figure de style, le zeugme. Il me paraît plus probable que Xavier utilise "g" comme *force* qu'il ne fasse du style dans sa réponse à l'item #1.

une *force*, ce qui distingue la réponse de Rose des réponses des élèves qui utilise {poids} ou {lourdeur}, c'est-à-dire des réponses non conformes escomptées par l'enseignant.

Première hypothèse : *malentendu quant à l'usage de {masse}*

Une première hypothèse consiste néanmoins à envisager que Rose utiliserait {masse} en lieu et place de {poids}, ou encore qu'elle utiliserait indifféremment {masse, poids}. Dans cette hypothèse, Rose considérerait les poids des balles comme des propriétés de celles-ci, et donner la boule de pétanque première à toucher le sol constituerait une schématisation similaire à celle de la préconception décrite dans la littérature et que l'enseignant rattache dans son mémoire professionnel à la conception aristotélicienne d'un corps lourd cherchant à rejoindre son "lieu naturel". Ce serait une situation de malentendu car Rose reprendrait un objet de discours de la schématisation de l'enseignant ({masse}), qu'elle assimilerait à une classe-objet indifférenciée et unique {masse, [poids], [lourdeur]} dans sa propre schématisation, plutôt qu'à une nouvelle classe-objet {masse}, distincte de celle qu'elle connaît déjà {[poids]} et de manière conforme à l'usage qu'en fait l'enseignant.

Deuxième hypothèse : *une reconstruction inachevée de la schématisation de l'enseignant*

Mais il est également possible de rétablir la cohérence de la réponse de Rose en considérant qu'elle dénoterait bien {masse} en écrivant le signifiant "masse", et qu'elle utiliserait de manière correcte les savoirs enseignés pour déterminer la force de gravitation exercée sur les objets en chute libre. Dans ce cas, elle s'arrêterait à considérer les forces et ne développerait pas sa schématisation jusqu' à déterminer la valeur des accélérations des objets en chute libre (voir section 6.3.6.1, p. 442), puis la valeur de leur vitesses, à partir de la somme des forces exercées sur chaque balle en particulier [396]. Comme dans la seconde hypothèse présentée ci-dessus pour Ilona et Xavier, la schématisation de Rose constituerait un traitement lacunaire de la question : elle n'aurait pensé qu'aux forces, et c'est à défaut d'avoir poussé la schématisation jusqu'aux accélérations et vitesses que Rose parviendrait à la réponse donnant la boule de pétanque première à toucher le sol. Il n'y aurait pas de situation de malentendu dans ce cas, aucun indice allant dans le sens d'une reprise divergente de la schématisation de l'enseignant, l'objet de discours {masse} étant utilisé conformément au modèle enseigné. Il s'agirait plutôt d'une schématisation incomplète, inachevée, relativement à la question posée [397].

396. Nous sommes également arrivé à cette hypothèse d'un raisonnement inachevé précisément sur ce point pour le premier cheminement identifié.

397. Le caractère inachevé de la schématisation des élèves n'empêche pas qu'ils soient impliqués dans une situation de malentendu *par ailleurs*. Ainsi, je suis de l'avis que ce qui est inachevé dans la schématisation de Rose est également inachevé dans les schématisations des élèves regroupées autour du premier cheminement, mais celles-ci participent *en sus* à une situation de malentendu par leur usage d'une classe-objet indifférenciée. Incomplétude de la schématisation des élèves et divergence d'avec celle de l'enseignant sont des problèmes qui peuvent bien évidemment se cumuler à l'occasion, rendant encore plus complexe l'analyse du sens que donnent les élèves aux savoirs enseignés.

Troisième hypothèse : *un raisonnement implicite sur les forces de frottement*

Une troisième hypothèse consiste à attribuer à Rose un raisonnement implicite intégrant le frottement. Dans cette hypothèse, la justification par la masse se fait non pas en lien avec la force de gravitation - comme je l'ai supposé dans les deux hypothèses précédentes - mais en lien avec la force de frottement. La schématisation de Rose consisterait en une justification de la chute plus rapide de la boule de pétanque du fait que la force de frottement freine moins la boule de pétanque que la balle de tennis en raison de sa masse supérieure. Cette réponse n'est pas seulement cohérente : elle est également conforme avec les savoirs de référence (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985), quand bien même le frottement n'a pas fait l'objet d'une schématisation explicite par l'enseignant. Cependant, si l'on fait le calcul de cette différence de temps de chute entre les deux balles dues au frottement de l'air, on découvre que celle-ci est de l'ordre du millionième de seconde (voir section 6.3.6.1, p. 442).

Il n'est donc par surprenant que l'enseignant la considère négligeable. Pourtant, la question de savoir si cette différence est négligeable ou non ne dépend plus des savoirs enseignés en tant que tels, mais du contexte et des finalités de l'usage de ces savoirs : pour envoyer un satellite se poser sur un astéroïde, c'est une différence qui peut avoir son importance, alors que les appareils de mesure des jeux olympiques ne permettraient pas de déclarer qu'une balle l'emporte sur l'autre, malgré leur excellente précision allant jusqu'au millième de seconde.

Selon cette hypothèse, il y aurait ici une situation de malentendu inédite, portant sur l'importance d'un ordre de grandeur (le millionième de seconde), relativement à la question de l'item #1, ou plus précisément sur le sens *logique* ou *scalaire* du terme *avant* dans la question de l'item #1. Cette distinction entre sens *logique* et *scalaire* est discutée à la section 6.3.6.1 (p. 449).

Un indice en faveur de cette hypothèse nous est fourni par la réponse de Rose à l'item #7, reproduit ci-dessous (voir figure 6.14, p. 432) :

Voici la réponse de Rose à cette question :

Réponse de Rose au post-questionnaire - item #7

```
1 Rose: En même temps, car dans le vide il n'y a pas de frottement, alors on ne tient pas
2     en compte le poids.
```

Dans cette réponse, Rose considère qu'une boule de pétanque touche le sol en même temps qu'une plume, lorsque les objets tombent sous vide. Si je compare cette réponse à celle que Rose donne à l'item #1, je dispose d'un indice en faveur d'une prise en compte du frottement par cet élève à l'item #1, plutôt que de la force de gravitation. Cependant, l'item #7 étant effectué à la fin de la séquence, environ trois mois après l'item #1, il est aussi possible que Rose ait changé son point de vue entre-temps.

Il me paraît difficile de trancher entre ces diverses hypothèses au vu des traces à disposition. Elles montrent qu'il y a plutôt abondance de possibilités de cheminements cohérents de l'élève qui prennent

NB: Répondez à la question dans chaque situation en justifiant votre réponse.

– **Situation 1**:



Voici une plume et une boule de pétanque dans le vide, laquelle touchera le sol en premier si je les lâche de la même hauteur?

FIGURE 6.14 – Item 7 du questionnaire.

appui, d'une manière ou d'une autre, sur la schématisation de l'enseignant, et qu'il ne s'agit pas forcément d'une situation de malentendu, même si la dernière hypothèse va dans ce sens. Ces multiples explications possibles reposant uniquement sur l'analyse de la schématisation de l'élève, que ce soit au niveau de l'usage d'un objet de discours, du caractère inachevé de la schématisation ou d'un problème d'implicites, constitue un argument en défaveur d'une explication attribuant à l'élève une *conception erronée*. Selon le principe méthodologique présenté plus haut, il n'est guère raisonnable de postuler l'existence d'une *conception individuelle de l'élève*, qui échappe à l'observation, quand il est possible de rendre compte du phénomène étudié en se reposant uniquement sur ce que nous avons pu effectivement observer, à savoir les spécificité de la schématisation de Rose discutées ci-dessus.

La diversité de cheminements pertinents du point de vue de Rose que nous avons pu reconstruire constitue aussi un message encourageant à l'adresse du praticien : c'est une manière de montrer les nombreuses possibilités de dialogue entre enseignant et élève qui peuvent s'établir sur la prise en compte de la cohérence et de la pertinence d'une schématisation d'élève en pleine construction : après tout, les élèves sont censés être *en train* d'apprendre...

6.3.5 Évolution de la situation de malentendu portant sur la reprise indifférenciée par les élèves de deux classes-objets de l'enseignant

6.3.5.1 Introduction

Nous avons pu défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu pour le premier cheminement des élèves, qui part de la classe-objet {même force} pour arriver à une diversité de réponses. Cette situation se prête bien à une analyse étendue à l'ensemble de la séquence d'enseignement, permettant de donner un aperçu de la manière dont ces situations de malentendu ont évolué au fil de celle-ci.

Dans la section précédente, l'analyse du premier cheminement a permis d'énoncer assez simplement la divergence entre la schématisation de l'enseignant et celles des cinq élèves concernées autour d'une classe-objet {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur} qui reprend au moins deux classes-objets distinctes chez l'enseignant, mais reste indifférenciée chez les élèves. Dès lors, il est possible d'observer comment cette classe-objet évolue au fil des interactions sociales en tant qu'objet de discours. Pour examiner l'évolution de cette situation de malentendu, je vais me concentrer sur les interventions des cinq élèves concernés (Cassandra, Henriette, Laurie, Ophélie et Sylvie), et des groupes dans lesquels elles ont travaillés.

Au niveau temporel, je vais présenter de brèves analyses de seulement trois moments subséquents aux réponses au pré-questionnaire analysées pour établir la situation de malentendu. Le choix de ces moments est tributaire des traces à disposition :

Le moment #1 est situé à la phase 2 de la séquence (voir p. 306), et comprend les réponses de quatre des élèves concernées à l'une des questions de l'exercice 5 sur le logiciel *Marbles Move* ;

Le moment #2 est situé à la phase 3 de la séquence, et comprend la conversation médiatisée par *Digalo* de la demi-classe où se trouvent les élèves concernés et adressant la question de l'item #1 ;

Le moment #3 est situé à la phase 4 de la séquence, et comprend les rapports expérimentaux écrits des groupes où travaillent les élèves concernées.

Dans cette analyse, ce qui m'intéresse particulièrement, c'est de savoir si l'objet de discours indifférencié est repris tel quel, s'il est progressivement affiné, et quels sont les usages qui en sont fait au fil des activités par les élèves, individuellement ou en groupe.

6.3.5.2 Moment #1 : l'exercice écrit et en groupe à l'aide du logiciel *Marbles Move*

La question 5E est extraite d'une série d'exercices effectués en groupe par les élèves lors de la phase 2 de la séquence. Elle porte directement sur la classe-objet où se situe la situation de malentendu analysée ci-dessus :

Feuille d'exercices en classe avec le logiciel *Marbles Move* - Exercice 5E

```
1 Lorsque l'on donne la valeur g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre, de
2 quoi s'agit-il? D'une force, d'une accélération, d'une vitesse?
```

Cette question a été travaillée en groupe par les élèves environ deux mois après la passation du pré-questionnaire. Les réponses des élèves sont manuscrites sur une feuille par groupe, car chaque groupe ne disposait que d'une seule feuille d'exercices. Voici les réponses des différents groupes où se trouvaient quatre des cinq élèves concernées par la situation de malentendu au moment du pré-questionnaire (Henriette étant absente ce jour-là) :

Réponses des élèves en situation de malentendu à l'exercice 5E

```
1 Groupe de Cassandra et Laurie :          une force
2 Groupe d'Ophélie:                        accélération
3 Groupe de Sylvie:                        9,81m/s2=une accélération terrestre
```

Remarque de transcription : *L'écriture des unités de mesure $\frac{m}{s^2}$ (ligne 3 de la transcription) est doublement soulignée par les élèves.*

La réponse du groupe constituée de Cassandra et Laurie à la question 5E peut être considérée comme un usage de la classe-objet indifférenciée autour de laquelle s'articule la situation de malentendu. En effet, la notion $|\text{CONSTANTE}|$, à laquelle se réfère explicitement la question 5E avec la classe-objet {valeur g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre}, est confondue (ou fusionnée) avec la classe-objet {force} utilisée par les élèves pour répondre à la question, alors que dans la schématisation de l'enseignant la classe-objet {force} ("force gravitationnelle", "force de gravitation", ...) se distingue de {valeur g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre} [398]. Ainsi, la classe-objet utilisée par Cassandra et Laurie pour répondre à l'exercice 5E ({[valeur g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre], force}) apparaît comme une reprise cohérente de la classe-objet indifférenciée {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur}, que ces deux élèves ont utilisée individuellement lors du pré-questionnaire. Le fait que Cassandra et Laurie sont à ce moment-là majoritaires dans leur groupe, composé de trois élèves, a probablement joué un rôle dans la prolongation de la situation de malentendu dans la schématisation de ce groupe en réponse à l'exercice 5E.

Les réponse des groupes d'Ophélie et Sylvie sont conformes aux savoirs enseignés. Dans la réponse du groupe de Sylvie, les unités ("m/s^2") sont doublement soulignées, indiquant peut-être un raisonnement déductif ou, au moins, une forme d'argumentation qui s'expliciterait ainsi : *puisque ce sont des mètres par seconde au carré, il s'agit d'une accélération*. Ce raisonnement est conforme avec l'enseignement reçu et souligne l'importance que les unités de mesure ont prise du point de vue de ce groupe. Il ne garantit pas, cependant, un raisonnement complet dans un exercice sur les objets en chute libre car l'utilisation des unités de mesure pour induire s'il s'agit d'une force ou d'une accélération peut s'apparenter à un "truc",

398. Plus précisément, l'opération effectuée par Cassandra et Laurie est une opération d'élaboration d'une classe-objet - à condition de considérer que les élèves répondent effectivement à la question posée - qui s'écrit : γ : {[valeur g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre]} $\Rightarrow$ {[valeur g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre], force}. Cette opération fournit un argument en faveur d'une prolongation de la situation de malentendu pour ces élèves.

une procédure qui permet de répondre à la question 5E sans pour autant disposer des connaissances conceptuelles nécessaires à d'autres usages des savoirs enseignés.

Les réponses des groupes d'Ophélie et Sylvie ne permettent pas de discuter de l'évolution de la situation de malentendu, du fait qu'elles sont conformes aux savoirs enseignés. En effet, celles-ci ne permettent pas au chercheur de repérer s'il s'agit d'un usage indifférencié de la notion |CONSTANTE| ou d'un usage de |CONSTANTE| dans le sens précis d'une accélération. Comme le chercheur part des réponses des élèves à une question *forçant à distinguer* l'usage d'une classe-objet {force} ou {accélération} ou encore {vitesse}, il n'est plus possible d'observer, en analysant une réponse conforme, si les élèves font ou non un usage différencié des classes-objet en question, la différenciation ayant déjà été imposée par la question.

6.3.5.3 Moment #2 : conversation écrite médiatisée par le logiciel *Digalo*

Le dispositif d'enseignement comprend une argumentation entre élèves lors de la phase 3, médiatisée par *Digalo*. La question à laquelle répondent les élèves est la même que lors du pré-questionnaire, à savoir celle de l'item #1 (voir figure 6.8, p. 406). Le graphe d'argumentation enregistré par le logiciel *Digalo* fournit la meilleure trace de l'activité conversationnelle des élèves dont nous disposons, et est reproduite par la figure 6.15 ci-dessous (p. 435).

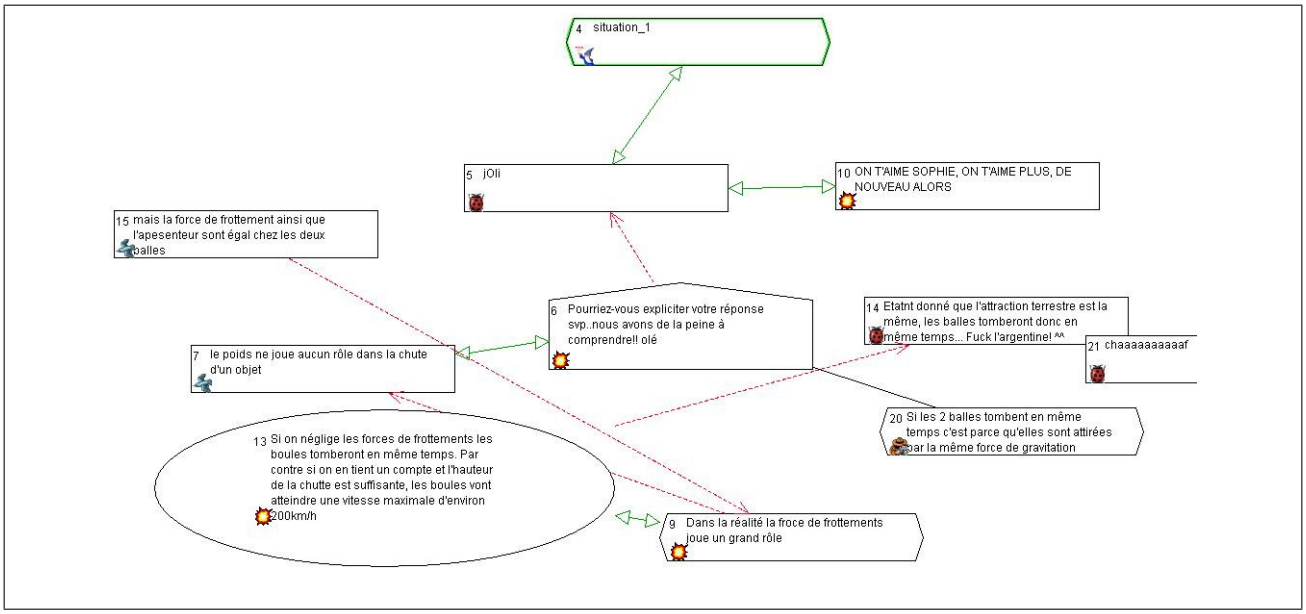


FIGURE 6.15 – Conversation *Digalo* de la demi-classe 02 sur l'item 1 du questionnaire.

Sur le graphe d'argumentation produit par cette demi-classe se trouvent les interventions de quatre des cinq élèves impliquées dans la situation de malentendu. Il ne manque que les interventions d'Henriette, qui se trouve dans l'autre demi-classe, et qui ne sont pas présentées ici car son groupe n'a posté que des réponses hors-sujet. Les groupes auteurs des interventions écrites dans le logiciel sont identifiables à partir des logo des avatars *Digalo* :

— Cassandra et Laurie sont dans le groupe (chapeau), qui produit l'intervention n°20 ;

— Ophélie est dans le groupe 🐞 (coccinelle), qui produit les interventions n°5, n°14 et n°21 ;

— Sylvie est dans le groupe 🐦 (oiseau), qui produit les interventions n°7 et n°15.

Les interventions *Digalo* sont numérotées dans leur ordre d'apparition à l'écran, ce qui permet de reconstruire l'ordre séquentiel des interventions médiatisées par l'outil informatique. Le fait que tous les numéros ne se suivent pas s'explique par des interventions abandonnées ou supprimées par les élèves. Vu que les élèves étaient présents dans la même salle, il convient de préciser ici que des échanges à haute voix ont parfois eu lieu aussi. Ces échanges ont été enregistrés, et comme ils ne portent pratiquement jamais sur la physique, mais plutôt sur des aspects relationnels, ils ne sont pas traités ici.

La première proposition de réponse dans cet échange médiatisé par *Digalo* est l'intervention n°7 du groupe 🐦 (oiseau), où travaille Sylvie : "le poids ne joue aucun rôle dans la chute d'un objet". Cette intervention va dans le sens de la réponse attendue par l'enseignant, mais ne fournit qu'implicitement une réponse à la question, à savoir que les deux balles touchent le sol en même temps parce que ce qui les distingue - leur "poids" [399] - ne joue aucun rôle.

Ensuite (intervention n°9), le groupe 💥 (explosion) s'oppose à cette première intervention en complexifiant la situation par l'introduction de forces de frottement : "dans la réalité la force de frottements joue un grand rôle". Ce même groupe propose plus tard ce qui sera la réponse la plus élaborée de ce graphe d'argumentation *Digalo*, l'intervention n°13 : "Si on néglige les forces de frottements les boules tomberont en même temps. Par contre si on en tient un compte, et l'hauteur de la chutte est suffisante, les boules vont atteindre une vitesse maximale d'environ 200km/h".

Cette réponse du groupe 💥 (explosion) effectue une organisation raisonnée sous forme conditionnelle, et fournit la réponse conforme aux savoirs enseignés, à condition de négliger les forces de frottement, ainsi qu'une réponse partiellement implicite pour la résolution du problème en tenant compte des forces de frottement. Les élèves n'écrivent pas, en effet, que la boule de pétanque touche le sol en premier dans ce cas, mais l'organisation raisonnée sous la forme d'une double réponse laisse penser qu'ils considèrent que les deux balles ne touchent pas le sol en même temps si l'on tient compte des forces de frottement. Pourtant, ils ne répondent pas explicitement dans ce cas et se limitent à affirmer que "les boules vont atteindre une vitesse maximale d'environ 200 km/h".

Le troisième groupe à intervenir, le groupe 🐞 (coccinelle) où travaille Ophélie, s'oppose à l'explication du groupe 💥 (explosion) en utilisant une flèche traitillée du logiciel, par l'intervention n°14 : "Étant donné que l'attraction terrestre est la même, les balles tomberont en même temps... Fuck l'argentine !". La classe-objet utilisée par ce groupe, {même attraction terrestre}, fait référence à une force constante et non à l'accélération constante $g = 9.81\frac{m}{s^2}$. Nous pouvons faire l'hypothèse que, du point de vue de ce groupe, la classe-objet {même attraction terrestre} est une reprise de la classe-objet indifférenciée identifiée dans

399. Sylvie utilise le terme "poids", mais il me semble qu'elle en fait ici plutôt usage en tant que propriété des objets, c'est-à-dire à partir d'une notion de |LOURDEUR|, puisque c'est de ce concept quotidien dont il s'agit et non pas du concept scientifique de "poids" au sens de *force de gravitation exercée sur une masse*.

la réponse d'Ophélie lors de la passation du pré-questionnaire, à savoir {même force}, à rapprocher de {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur}. Cette hypothèse revient à proposer que ce groupe effectue l'opération suivante :

γ_1 : {même force} ⇒ {même force, même attraction terrestre}

Les reprises conversationnelles sont des phénomènes complexes, et il est particulièrement difficile de décider s'il s'agit d'une reprise plus ou moins à l'identique (notée θ en logique naturelle) ou une élaboration de la classe-objet (que j'ai notée γ pour faire simple[400]). Dans le cas présent, j'ai opté pour une élaboration de la classe-objet (γ), car les élèves opèrent effectivement sur cette classe-objet dans le contexte de la physique lorsqu'elles y introduisent {attraction terrestre}, qui est plus spécifique que {force} tout en s'appliquant à une plus grand nombre d'objets que ceux considérés dans l'item #1 (le domaine de référence de la classe-objet est augmenté, il va désormais au-delà des deux boules considérées dans l'item #1).

L'hypothèse d'une opération γ_1 effectuée par le groupe où travaille Ophélie va dans le sens d'une prolongation, en tout cas jusqu'au moment de l'activité *Digalo*, de la situation de malentendu à laquelle elle participe lors de la passation individuelle du pré-questionnaire.

L'intervention suivante (n°15) postée par le groupe 🐦 (oiseau), où travaille Sylvie, s'oppose à la première intervention du groupe 💥 (explosion), sur l'importance des forces de frottement : "mais la force de frottement ainsi que l'apesanteur sont égal chez les deux balles". Cette intervention reprend {apesanteur}, avec une graphie spécifique à Sylvie (voir sa réponse individuelle au pré-questionnaire, p. 417) qui permet ici de proposer plutôt l'hypothèse d'une reprise :

θ_1 : {même force d'apesanteur} ⇒ {même force d'apesanteur, apesanteur égal}

Bien que l'adjectif "égal" n'effectue pas l'accord avec "force de frottement"et "apesanteur" dans la réponse du groupe 🐦 (oiseau), je m'attendrais ici à un accord de l'adjectif non seulement au féminin - dont l'absence montre que l'élève ne maîtrise pas la règle grammaticale ou n'y prête pas attention - mais aussi au pluriel, dans le sens où l'énumération fait penser que "force de frottement" et "apesanteur" sont sur le même plan sémantique et, partant, qu'il s'agit ici deux fois d'une force, selon le point de vue de ce groupe ("mais la force de frottement ainsi que l'apesanteur sont égal**[es]** chez les deux balles"). Dans ce cas, il y a continuation de la situation de malentendu dans laquelle Sylvie est impliquée. Sinon, au minimum, il y a confusion entre force et accélération dans la schématisation du groupe.

Si l'on accepte cette correction de l'intervention n°15, celle-ci comprend, en plus de l'opération θ_1 décrite ci-dessus, une opération qui étend la classe-objet {même force d'apesanteur} aux forces de frottement, alors qu'elle s'appliquait jusque là uniquement à la force de gravité dans cette situation de malentendu :

400. Grize propose dans certains textes (p.ex. Grize 1996) des variantes de l'opération γ indicées avec des nombres, et d'autres opérations d'élaboration des classes-objet (ρ), dont le niveau de détail n'est pas très utile ici. Par ailleurs, dans d'autres textes (p.ex. Grize et de Montmollin 2008), ces distinctions fines semblent abandonnées par Grize lui-même.

γ_2 : {même force d'apesanteur} ⇒ {même force d'apesanteur, force de frottement égal}

La notion indifférenciée |CONSTANTE| s'applique, par l'opération γ_2, à la force de frottement et non seulement à la force de gravitation. L'opération γ_2 permet aux élèves du groupe de fournir la réponse attendue par l'enseignant - à savoir que les deux objets touchent le sol en même temps - tout en l'assimilant à la classe-objet utilisée précédemment par Sylvie, à savoir {même force d'apesanteur}, et en y intégrant la force de frottement mentionnée par d'autres groupes sur *Digalo* (p.ex. l'intervention n°9). En accommodant légèrement cette classe-objet par γ_2 et θ_1, de manière à obtenir {même force d'apesanteur, force de frottement égal, apesanteur égal}, la schématisation des élèves permet d'aboutir à la réponse attendue [401] sans remettre en question la schématisation que Sylvie effectue lors de la réponse individuelle au pré-questionnaire.

Ces deux opérations (θ_1 et γ_2) effectuées dans l'intervention n°15 permettent de défendre l'hypothèse d'une prolongation de la situation de malentendu dans la réponse du groupe (oiseau) - formé par Barbara et Sylvie - au moment de l'activité *Digalo*. Cette prolongation de la situation de malentendu a cependant cela de spécifique qu'elle étend encore la classe-objet indifférenciée à la force de frottement, probablement pour s'accommoder aux interventions des autres élèves sur le graphe d'argumentation. En conséquence, la classe-objet est encore plus indifférenciée après son élaboration à ce moment-là.

Enfin, la dernière intervention de ce graphe d'argumentation, l''intervention n°20, n'est pas liée par les élèves aux propositions de réponse des autres groupes, mais uniquement à la demande d'explicitation du groupe (explosion). C'est l'unique intervention du groupe (chapeau) où travaillent Cassandra et Laurie, et peut être considérée comme leur réponse à ce moment de la séquence plutôt que comme une intervention dans le débat : "Si les deux balles tombent en même temps c'est parce qu'elles sont attirées par la même force de gravitation". Cette intervention fait usage d'une classe-objet, à savoir {même force de gravitation}, qui peut être considérée comme une reprise (opération θ) de la classe-objet {même force de gravité} des réponses de Cassandra et Laurie au pré-questionnaire (voir p. 6.3.3.2) :

θ_2 : {même force de gravité} ⇒ {même force de gravitation}

Vu cette opération de reprise, je fais l'hypothèse qu'il s'agit aussi ici d'une prolongation de cette situation de malentendu jusqu'à ce moment-là de la séquence pour ces deux élèves.

6.3.5.4 Moment #3 : réponse écrite et de groupe dans le rapport expérimental

Lors de cette activité, les élèves disposent d'une balle de ping pong, de masse moindre, d'une balle "magique" de masse moyenne qui rebondit fortement, d'une balle en gomme de couleur argentée et de masse plus importante, et d'un chronomètre pour mesurer les durées de chute des trois objets. Les trois

401. Notons que, suite au travail de groupe et aux discussions entre élèves, les élèves ont peut-être entendu la réponse conforme aux savoirs enseignés à ce moment-là de la séquence.

balles sont de tailles approximativement semblables. Après quelques investigations, les élèves produisent à nouveau une réponse de groupe à l'item #1, sous la forme écrite d'un "rapport expérimental" [402].

Les traces à disposition sont les enregistrements audio et vidéo des échanges entre les élèves (mais malheureusement pour certains groupes uniquement), et leurs réponses écrites dans les rapports expérimentaux. Je me concentrerai à nouveau sur les productions des élèves impliquées dans la situation de malentendu. Nous ne disposons malheureusement d'aucune trace de l'activité d'Ophélie, qui était absente ce jour-là, ni de son groupe (coccinelle), réduit ce jour-là à un seul élève (Victor) qui était par ailleurs absent lors de l'activité *Digalo* (phase 3). Les réponses écrites aux rapports expérimentaux des trois groupes restants sont reproduites ci-dessous dans leur intégralité.

Le groupe (chapeau), comprenant Cassandra, Julianne et Laurie, propose la conclusion suivante après leurs investigations :

Extrait du rapport expérimental de Cassandra et Julianne et Laurie - item #1

```
1 Conclusion: La balle argentée et la balle magique tombe en même temps (arrive en même
2 temps sur le sol). La balle argentée et la balle de ping-pong arrive aussi en même temps.
3 Peu importe le poids qui diffère les balles, elles tomberont toujours en même à cause de
4 la force de gravité qui est toujours la même.
```

Cette justification reprend la classe-objet sur laquelle porte le malentendu, {même force de gravité}, pour justifier la réponse conforme escomptée par l'enseignant. Seule Julianne, dans le groupe, aurait changé sa schématisation par rapport au moment de passation du pré-questionnaire, puisqu'elle donnait alors la boule de pétanque en premier, sans justification. La situation de malentendu ne semble pas avoir évolué à ce moment-là de la séquence pour Cassandra et Laurie.

Le groupe (oiseau), comprenant Aurélie, Barbara et Sylvie, fournit les explications suivantes dans son rapport expérimental concernant l'item #1 :

Extrait du rapport expérimental de Aurélie et Barbara et Sylvie - item #1

```
1 même temps parce que la masse n'influence pas la vitesse sur un plan vertical.
2 Le poids a une influence sur la trajectoire alors que dans la situation 4, le poids
3 n'est pas tenu en compte puisque il est sur l'axe x et ici sur l'axe y
```

Remarque de transcription : *L'écriture manuscrite des élèves change aux lignes 2 et 3 de la transcription. La graphie de la ligne 1 a pu être identifiée comme étant de la main de Sylvie.*

Il s'agit d'un groupe ayant une diversité d'opinions dès le départ. De plus, Aurélie était absente le jour du travail individuel sur le pré-questionnaire, et lors de l'activité *Digalo*. Les enregistrement audio nous renseignent par ailleurs qu'une discussion soutenue a lieu à ce propos dans ce groupe. J'y reviendrai dans l'analyse de la situation de malentendu portant sur l'item #4 du pré-questionnaire.

402. Cette dénomination fait référence, dans le contexte de cette classe, à une pratique régulière où les élèves doivent fournir par écrit non seulement une réponse à des questions ou un problème, mais aussi une justification ou "argumentation" faisant usage de mesures.

Ce groupe propose une réponse conforme au modèle, rédigée par Sylvie (ligne 1), mais cette réponse est aussi consistante avec sa notion de |CONSTANTE|, qu'elle applique à la fois à la {force d'apesanteur} et aux {forces de frottement}. Dès lors, Sylvie ne fournit pas de justification suffisamment explicite pour que nous puissions analyser l'évolution de la situation de malentendu.

Une justification est fournie aux lignes 2 et 3 par une autre élève du groupe (Barbara ou Aurélie), reconnaissable à l'écriture manuscrite différente. Cette justification est inconsistante avec la réponse de Sylvie à la ligne 1, et avec la réponse du groupe (rédigée par Sylvie, selon l'enregistrement vidéo). Elle schématise un lien entre les questions des items #1 et #4, mais elle ne permet pas d'en apprendre davantage concernant une éventuelle prolongation de la situation de malentendu.

Je ne peux que conclure que le groupe ne parvient pas à une réponse partagée à l'item #1 dans son rapport expérimental. Alors que précédemment, au moment de l'activité *Digalo*, Barbara et Sylvie prolongeaient la situation de malentendu par leur réponse conjointe, l'arrivée d'Aurélie pour ce moment 4 de la séquence suscite un débat que les élèves ne parviennent pas à conclure avec une réponse commune.

Le groupe dans lequel travaille Henriette, qui était absente à l'activité *Digalo*, fournit la réponse suivante dans son rapport expérimental :

Extrait du rapport expérimental de Henriette Rose et Thibault - item #1

```
1 m1: 80g t1=00''67s
2 m2: 9g t2=~le même -> imprécision de l'œil et du chronomètre manuel.
3 Si on ne prend pas en compte la force de frottement, les boules tomberont en même temps.
4 Mais si on la prend en compte, on remarque que le temps de chute dépend du poids et de
5 la forme (-> frottement) de l'objet.
```

Henriette est en groupe avec Rose et Thibault. J'avais rangé les réponses de Henriette et Rose à l'item #1 du pré-questionnaire dans la même catégorie : il s'agissait des deux réponses ambiguës proposant la boule de pétanque première à toucher le sol, alors que la justification semblait quant à elle plutôt conforme aux savoirs enseignés. Par hasard, ces deux élèves se sont retrouvées dans le même groupe. Thilbaut, quant à lui, a fourni lors de la passation du pré-questionnaire une réponse que j'ai rangée dans les réponses escomptées et non conformes, attribuées par l'enseignant à une préconception. La réponse de ce groupe dans son rapport expérimental reproduit ci-dessus, indique une évolution de la schématisation de ces élèves, qui fournissent à cette phase 4 de la séquence une réponse parmi les plus avancées, articulant un double modèle, avec ou sans les forces de frottement, et qui est une schématisation conforme aux savoirs enseignés.

Si la schématisation de ce groupe a évolué, les traces ci-dessus fournissent un indice que ce n'est pourtant pas l'observation et la mesure lors des ateliers expérimentaux qui est à l'origine de cette évolution, puisque ces élèves vont jusqu'à explicitement nier la pertinence de l'observation à l'œil nu et de mesures à l'aide d'un chronomètre manuel, les considérant trop imprécises. Là aussi, ils n'ont pas tort, puisque la différence de temps qui pourrait être mesurée, en référence à la question de l'item #1, est de l'ordre du millionième de seconde avec des objets comme la balle de tennis et la boule de pétanque (voir section

6.3.6.1, page 442), et les objets à disposition pour cet atelier ont une différence de masse encore plus faible. Dès lors, si ce n'est pas l'observation et la mesure qui a permis de remettre en question les réponses de ces élèves, c'est probablement les divergences internes au groupe, ou éventuellement l'exposition aux réponses et arguments des autres groupes qui sont à l'origine de cette évolution. Une argumentation semblable à ce qu'ils proposent dans leur rapport expérimental leur a été présentée par un autre groupe lors de l'activité *Digalo* (voir le graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item#1, Figure C.9, p. 908).

En résumé, nous observons trois cas de figure lors des activités expérimentales de la phase 4 de la séquence :

1. Dans le premier groupe, les élèves sont majoritaires à être concernées par le malentendu et sont confrontées à une schématisation moins développée que la leur au niveau de l'argumentation par Julianne (la seule élève à ne fournir aucune justification lors du pré-questionnaire). Ce groupe fournit de nouveau une schématisation faisant usage de la classe-objet sur laquelle repose le malentendu.

2. Dans le deuxième groupe, l'élève concernée par la situation de malentendu (Sylvie) est minoritaire et confrontée à une schématisation différente (celle de Barbara) et au point de vue d'une élève qui était absente (Aurélie). Ce groupe n'arrive pas à s'entendre sur une schématisation commune. En outre, la réponse de Sylvie ne permet pas de savoir si elle a effectivement adopté un autre usage de la classe-objet considérée.

3. Dans le troisième groupe, les élèves sont majoritaires à être concernées par le malentendu et sont confrontées à une schématisation différente de la leur au niveau de l'argumentation (celle de Thibault) : il y a une hétérogénéité des schématisations dans le groupe. Ce groupe parvient à une solution parmi les plus avancées de la classe, articulant une double réponse selon qu'elle prennent ou non en compte les forces de frottement.

La résolution de la situation de malentendu semble dépendre davantage de la composition des groupes, et de leur engagement avec succès dans la construction d'un point de vue commun à partir de schématisations différentes, que de la confrontation avec les mesures du dispositif expérimental. En effet, le seul groupe à avoir construit une réponse plus avancée est allé jusqu'à remettre en cause la précision des mesures : c'est donc plutôt la confrontation de schématisations divergentes dans le dialogue qui a permis aux élèves de dépasser leurs premières réponses individuelles, quand ils l'ont fait.

6.3.6 Discussion

La discussion de cette situation de malentendu est particulièrement longue, parce qu'elle est l'occasion de soulever des enjeux de la situation à différents niveaux et mène parfois à des enquêtes et analyses complémentaires. Afin d'organiser ces réflexions séquentiellement, je leur donnerai pour fil rouge [403] les quatre étapes suivantes :

403. L'organisation de cette discussion a été construite après coup, et uniquement dans le but de la rendre accessible.

I. Une analyse complémentaire visant à reconstruire les procédures et opérations implicites à la résolution algébrique de l'item #1, avec ou sans force de frottement, permet de soulever le problème du *sens* que prend la tâche pour les élèves, pour l'enseignant et pour le système éducatif : quels sont les savoirs en jeu ? Quels sont les objectifs d'apprentissage de l'enseignant ? De quelles connaissances orchestre-t-on la construction en déléguant cette tâche aux élèves ?

II. Les questions soulevées ci-dessus invitent à une analyse plus approfondie de la question posée aux élèves à l'item #1, de manière à mettre en perspective leurs réponses, et en particulier la situation de malentendu. Dans ce but, je présente une brève analyse de la construction de l'item #1 par l'enseignant, en remontant en amont de la situation de malentendu analysée pour examiner ce qui, dans l'histoire de la conception de cette tâche, prépare le terrain aux difficultés constatées.

III. La situation de malentendu décrite, complétées des deux analyses en (1) et (2), permet d'aborder la question des difficultés des élèves engagés dans l'apprentissage de la mécanique. Sans donner une réponse définitive à cette vaste question, évidemment, je montre néanmoins que ces analyses permettent un éclairage nouveau de la problématique des difficultés des élèves dans l'apprentissage conceptuel en sciences sur les contenus étudiés, en particulier sur la question des conceptions attribuées aux élèves.

IV. Le nouvel éclairage apporté aux difficultés des élèves invite à approfondir le modèle de la situation d'interlocution utilisé pour analyser la situation de malentendu. Cette discussion fournit l'occasion de revenir sur certains implicites - mais ceux de la recherche cette fois-ci - concernant les choix théoriques et méthodologiques effectués, de manière à relever la complexité de la situation de communication étudiée. La mise en évidence de cette complexité d'une approche de la transmission des savoirs en milieu scolaire en tant que (vaste) *situation d'interlocution*, ses implications pédagogiques et ses problèmes méthodologiques et théoriques, plaide pour une *fabrication conversationnelle de l'erreur* attribuée aux élèves, un processus que je tente de décrire mais qui consiste surtout en une nouvelle perspective de recherche, les observations permettant de l'établir manquant encore d'un étayage suffisant.

6.3.6.1 Analyse des implicites à la situation d'interlocution

Introduction

Ce commentaire présente une analyse complémentaire, qui a pour objectif la reconstruction d'éléments implicites à la situation de malentendu, du point de vue du chercheur et dans une démarche interprétative. Les implicites reconstruits sont souvent des actions ou opérations cognitives qui ne font pas l'objet d'un discours, mais qui participent néanmoins à la situation d'interlocution. Ces implicites constituent, dans le modèle de la communication de Grize, un préconstruit culturel. Il s'agit de ressources présentes dans la culture de la classe, jouant le rôle de références partagées sur lesquelles la schématisation repose à certaines occasions. Pourtant, la connaissance qu'ont les élèves de ces préconstruits varie d'un individu à l'autre.

Ces préconstruits sont non seulement plus ou moins maîtrisés selon les individus, mais également selon les moments, car ils font l'objet de l'apprentissage des élèves [404].

Pour effectuer cette reconstruction des implicites, je suis parti de diverses traces, enregistrements audio et documents écrits, qui s'y réfèrent sans les expliciter, mais aussi d'observations directes du chercheur immergé dans le quotidien de la classe. En particulier, les actions que les élèves effectuent sans qu'aucune demande explicite ne leur soit formulée fournissent des indices au chercheur de ce qui constitue la norme de la classe, et qui fonctionne au niveau communicationnel comme un monde implicite plus ou moins partagé. Il s'agit, par exemple, du fait que la majorité des élèves utilisent leur formulaire pour répondre aux questions ou qu'ils effectuent des calculs que la consigne n'exige pas explicitement.

Il est naturellement impossible de proposer une présentation systématique et exhaustive des implicites à la communication, même en se limitant à une situation d'interlocution particulière. Un tel exercice risquerait de conduire le chercheur qui s'y aventure à une analyse historico-culturelle quasiment infinie. Je me limiterai ci-dessous à deux axes d'analyse pour reconstruire ce qui me parait contribuer à la compréhension de la situation de malentendu *g comme gravité* : (1) les procédures et (2) les opérations mathématiques, que les élèves doivent [405] ou peuvent [406] mettre en œuvre pour résoudre la situation-problème de l'item #1.

La question de l'item #1 est posée verbalement, en termes qualitatifs, et aucune valeur numérique n'est explicitement exigée des élèves. Dans l'exercice à visée diagnostique que comporte le pré-questionnaire, les élèves sont invités à répondre sans ouvrir leur formulaire ou leur cours. Pourquoi trouve-t-on alors de nombreuses références à une solution numérique ou algébrique dans les schématisations des élèves ? Pourquoi n'en restent-ils pas à une pratique de *physique qualitative* [407] ?

Dans le contrat didactique spécifique de cette classe (voir chapitre 4), la solution attendue consiste presque toujours à identifier la ou les formule(s) mathématique(s) pertinente(s) dans le Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie (1985) que tous les élèves ont dû acquérir au début de leurs études, et à savoir l'utiliser pour calculer la valeur numérique demandée. C'est par exemple ce que l'enseignant leur demande de fournir dans les *rapports expérimentaux*, lorsqu'il leur demande "d'argumenter" : il s'agit de justifier en quoi les mesures et calculs quantitatifs permettent de justifier la réponse à un

404. La présentation statique de l'implicite telle que nous la proposons ci-dessous est par conséquent une grossière simplification des procédures et opérations mathématiques implicites à la communication, en particulier parce que cette présentation comprend le moins possible d'éléments de manière à obtenir le résultat escompté le plus rapidement possible, ce qui n'est que rarement le cas dans les activités cognitives effectives des élèves. En effet, il leur faut souvent essayer plusieurs procédures ou opérations peu pertinentes avant d'obtenir celles qui permettent de réussir la tâche.

405. Le verbe *devoir* est utilisé ici dans le sens normatif, en référence à une *norme sociale*, et non au sens d'un devoir ou d'une obligation, l'implicite fonctionnant dans cette situation d'interlocution comme une *norme*, que l'on peut analyser comme un *contrat didactique* spécifique à la classe étudiée, ou tout simplement comme le résultat du processus de *normalisation* décrit en psychologie sociale, à savoir l'imitation et la répétition de certaines actions au sein du groupe constitué.

406. Il s'agit bien entendu aussi de ressources : ce qui fonctionne comme une *norme sociale* est simultanément une ressources pour l'élève pour réussir la résolution de problème, du moment que la *dévolution* est effective et que l'élève considère qu'il s'agit de *son* problème, et/ou du moment qu'il y a plusieurs façon de résoudre un problème à disposition et que l'élève s'engage dans cet espace de liberté et ne fait pas seulement ce qui est requis de sa part, mais effectue également un choix.

407. Ce terme est utilisé (voir p.ex. : Petitot, 1994) pour désigner des raisonnements en physique qui ne se basent pas d'emblée sur le traitement de quantités et l'utilisation du langage mathématique.

problème posé verbalement et exigeant une réponse qualitative (par exemple : “oui”, “A est plus rapide que B”), qui est fondée sur l'usage de la ou des formules pertinentes.

Dès lors, la mise en équations de la situation-problème et la résolution des équations est susceptible de fournir la méthode privilégiée des élèves pour répondre à la question, car c'est à ce genre d'exercices (dénommés “exercices d'application”) que les élèves sont le plus habitués. En conséquence, je présente ci-dessous la résolution algébrique permettant de fournir la réponse à l'item #1 conforme aux savoirs enseignés et escomptée par l'enseignant, ainsi que sa variante qui prend en compte une force de frottement, car ces solutions algébriques sont implicites à de nombreux échanges au cours de la séquence d'enseignement étudiée, par exemple lors de la réponse donnée par l'enseignant à l'item #1 à la phase 5 de la séquence (voir p. 416).

Procédures implicites

Examinons dans un premier temps les procédures impliquées par la réponse conforme aux savoirs enseignés. Analyser la chute libre des deux balles implique plusieurs étapes, notamment :

— traiter les balles comme des points matériels ou des particules, alors qu'elles sont représentées comme des objets disposant d'un volume et d'une forme sur le schéma ;

— isoler le système présenté, en ne prenant en compte que les deux balles, le sol, la gravitation terrestre, et éventuellement le frottement de l'air, quoique dans cet exercice il n'est généralement pas inclus dans le système [408] ;

— utiliser l'expression algébrique et vectorielle de la loi de la somme des forces pour transformer la force exercée sur l'objet en accélération ;

— utiliser les équations de cinématique pour transformer l'accélération en vitesse, puis en durée de la chute pour chaque objet [409].

Ressources à disposition des élèves

Avant de proposer une mise en équation de la résolution de l'item #1, je vais tenter de reconstruire à partir du polycopié du cours théorique et dans l'ordre, les étapes importantes de l'introduction des ressources permettant d'y répondre, essentiellement l'introduction de l'accélération des objets en chute libre et de la force gravitationnelle. Les documents originaux distribués en classe qui constituent les traces de cette analyse sont fournis en annexe (Annexe B, figures B.33, B.34, B.35 et B.31).

Le premier discours au sujet des objets en chute libre dans le polycopié arrive à la fin de cours de cinématique étudié l'année précédente (voir Annexe B, figure B.31). Le cours ne parle pas explicitement

408. En effet, les élèves peuvent décider de négliger le frottement, soit le prendre en compte et juger de la différence de temps, ce qui conduit à la conclusion que cette différence est *négligeable*.

409. Il est néanmoins plus ou moins convenu, dans cette classe, que lorsque l'accélération des deux balles est connues, il suffit de déduire une vitesse proportionnelle à l'accélération de l'objet en chute libre et, partant, une durée plus courte de chute.

de force, mais introduit la constante "g" sous l'intitulé "la chute libre d'un corps dans le vide". Cette constante est présentée sous la forme d'une affirmation sans justification : "les objets lancés retombent sur le sol de la Terre avec une accélération constante, dirigée vers le bas". Le cours donne ensuite la valeur de "g" à l'équateur et celle aux pôles, montrant une variation de $0,05\frac{m}{s^2}$ entre les deux. Il mentionne aussi l'accélération constante des objets en chute libre sur la Lune, afin de montrer que la valeur de la constante change selon l'astre considéré. Cette présentation en cinématique se termine par quelques équations que les élèves peuvent reprendre et utiliser. Par contre, il n'y a pas de présentation algébrique permettant le détermination de la valeur de "g", celle-ci faisant usage des forces et des lois de Newton présentées l'année suivante, dans le cours de mécanique.

Dans le cours de mécanique, au début de l'année en cours, la force de gravitation est présentée aux élèves à partir de la loi de la force de gravitation, qui permet de modéliser le mouvement des planètes. La force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre est le premier exercice donné aux élèves considérant explicitement une force. A la suite de cet exercice, les élèves sont invités à calculer la valeur de g=9.81 $\frac{m}{s^2}$ à partir de la loi de la force de gravitation, alors que la valeur en tant que telle est déjà connue depuis le cours de cinématique de l'année précédente (voir ci-dessus). Les procédures de résolution de ces exercices sont présentées en détail à l'occasion de la situation #1 (voir p. 383 et suivantes). Ces deux premiers exercices fournissent aux élèves les ressources pour poser les équations pour une résolution algébrique de l'item #1, que je présente ci-dessous.

Opérations implicites à une résolution algébrique de l'item #1 sans forces de frottement

Si les forces de frottement ne sont pas prises en compte, la résolution algébrique est pratiquement identique à l'exercice 2 discuté dans la situation #1, qui consiste à "extraire g de la loi de la force de gravitation" (voir p. 383 et suivantes). Je propose ici une synthèse de ce raisonnement tel qu'il peut être utilisé pour répondre à la question de l'item #1.

La vitesse initiale des deux objets est nulle. Les deux objets sont à une distance égale du sol. Les masses des deux objets sont différentes, celle de la balle de tennis est inférieure : $m_1 < m_2$. Pour déterminer quelle balle touche le sol en premier, c'est normalement la vitesse qui est déterminante, puisque la distance avec le sol est égale pour les deux objets : l'objet ayant une plus grande vitesse touche le sol en premier. Cependant, les vitesses initiales étant nulles, on peut se contenter de comparer l'accélération des deux objets pour savoir lequel touche le sol en premier.

À partir de là, les élèves ayant retenu la phrase du cours "les objets lancés retombent sur la Terre avec une accélération constante" (voir Figure B.31, 831), peuvent l'utiliser comme une connaissance prédicative pour répondre à la question sans mettre en œuvre les connaissances opératoires présentées en détail ci-dessous. Il suffit de répondre que les deux balles touchent le sol en même temps en déclarant l'accélération de tous les objets en chute libre constante. Dans ce cas, les élèves font confiance au discours de l'enseignant sur son polycopié, sans chercher à s'approprier des connaissances opératoires à partir de la schématisation de l'enseignant.

Autrement, les élèves accordants moins de confiance au discours de l'enseignant, ou qui souhaitent reconstituer par eux-mêmes le résultat permettant d'affirmer la constance de l'accélération des objets en chute libre *dans ce cas-là*, peuvent vérifier que l'accélération est effectivement constante dans les conditions de l'item #1 à l'aide des opérations présentées ci-dessous.

Dans un premier temps, il s'agit de réfléchir aux déterminants de l'accélération. L'accélération est d'autant plus élevée que la (somme des) force(s) qui s'exerce sur l'objet dans la même direction est grande, et d'autant moindre que la masse de l'objet est importante. Ces deux rapports s'expriment par l'équation 6.7 ci-dessous :

$$\overrightarrow{F}_{nette} = m \cdot \overrightarrow{a} \tag{6.7}$$

La somme des forces, ou "$\overrightarrow{F_{nette}}$", et l'accélération sont des grandeurs vectorielles, c'est-à-dire qu'elles ont notamment une direction et un sens. Dès lors, avant de pouvoir utiliser l'équation 6.7 dans une résolution algébrique, il faut vérifier que le sens et la direction des vecteurs sont identiques. En considérant que la force de gravitation est la seule force exercée sur la balle, c'est le cas, puisque la force de gravitation et l'accélération de la balle en chute libre s'exercent en direction du sol. À partir de là, la résolution algébrique peut commencer. Elle consiste à mettre en relation d'égalité la somme des forces ($\overrightarrow{F}_{nette}$ de l'équation 6.7 ci-dessus) et la loi de la force de gravitation, et d'utiliser celle-ci pour en déterminer la valeur. Comme l'accélération de l'objet en chute libre va dans la même direction et le même sens que la somme des forces et $\overrightarrow{F_g}$, les vecteurs peuvent être traduits en grandeurs scalaires, comme énoncé ci-dessous par l'équation 6.8, où m est la masse de l'objet en chute libre, G est une constante et, pour les objets en chute libre sur la surface de la terre, M est la masse de la Terre et r le rayon de la terre :

$$F_{nette} = F_g = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \tag{6.8}$$

Le résultat nous permet de déterminer la force de gravitation exercée sur un objet de masse m à la surface de la terre, ce qui est exprimé ci-dessous par l'équation 6.9 :

$$F_{nette} = F_g = 9.81 \cdot m \tag{6.9}$$

Pour obtenir l'accélération de l'objet en chute libre, il faut introduire la loi de la somme des forces (voir équation 6.7, p. 446) dans l'équation. L'équation 6.10 ci-dessous donne le résultat de cette opération :

$$F_{nette} = F_g = 9.81 \cdot m = m \cdot a \tag{6.10}$$

A partir de cette équation, on peut extraire la valeur de l'accélération de la masse en chute libre, en reformulant l'équation à partir de a, comme énoncé ci-dessous dans l'équation 6.11 :

$$a = \frac{F_{nette}}{m} = \frac{9.81 \cdot m}{m} = 9.81 \tag{6.11}$$

En conclusion de ces opérations, la réponse consiste à donner pour réponse que la balle de tennis et la boule de pétanque arrivent en même temps sur le sol, car n'importe quelle masse m chute avec une accélération de $9,81\frac{m}{s^2}$. Sachant que les deux balles accélèrent de manière identique et qu'elle partent toutes les deux à une vitesse nulle, leurs vitesses de chute sont identiques à tout instant, quoique variables au cours de la chute.

Opérations implicites à une résolution algébrique de l'item #1 avec forces de frottement

Si les forces de frottement sont prises en compte, les opérations sont plus complexes [410]. De nombreuses mises en équation pourraient être proposées pour tenir compte des forces de frottement. Je me contenterai d'une mise en équation minimale, qui ne tient compte que d'une seule force de frottement, le frottement de l'air, et qui considère cette force identique pour les deux balles, car cela suffit à présenter les conséquences que je souhaite mettre en évidence : à savoir que la résolution devient plus complexe et, surtout, que la réponse à la question n'est pas la même. Nous discuterons des implications de ce résultat à la fin de ce commentaire.

Pour mettre la situation-problème de l'item #1 en équation tout en tenant compte d'une force de frottement de l'air, il s'agit de reprendre la mise en équation présentée ci-dessus et d'y inclure une force de frottement de l'air $\overrightarrow{F_f}$ qui s'applique sur chacune des balles dans la même direction que la force de gravitation mais en sens contraire. Nous avons vu que la résolution algébrique ne pouvait se faire qu'après avoir considéré la direction et le sens des forces exercées sur les balles. En prenant en compte une force de frottement, la valeur de celle-ci sera soustraite à la valeur de la force de gravitation exercée sur la balle vers le bas, plutôt qu'additionnée, parce qu'elle est orientée dans la même direction mais en sens contraire. En reprenant la loi de la somme des forces, l'équation 6.10 (voir p. 446) est remplacée par l'équation 6.12 ci-dessous :

$$F_{nette} = F_g - F_f = (9.81 \cdot m) - F_f = m \cdot a \tag{6.12}$$

Dès lors, nous pouvons extraire l'accélération d'une masse m en chute libre en développant l'équation, comme énoncé ci-dessous (équation 6.13) :

$$a = \frac{F_{nette}}{m} = \frac{(F_g - F_f)}{m} = \frac{(9.81 \cdot m) - (F_f)}{m} = 9.81 - \frac{F_f}{m} \tag{6.13}$$

Ces quelques opérations permettent de montrer qu'il n'est plus possible, lorsqu'une force de frottement est prise en compte, de procéder à la simplification par la masse qui nous avait permis de considérer l'accélération des objets en chute libre comme une constante. En conséquence, même avec une force de

410. Même si cette résolution ne fait pas partie des réponses auxquelles l'enseignant s'attend, il nous paraît pertinent de considérer qu'elle fait partie des implicites de la communication, notamment parce que l'item #1 n'exclut pas explicitement la prise en compte de forces de frottement et que l'enseignant fait référence à cette solution lors de son corrigé oral (voir section 6.3.3.1, p. 416), quoique très rapidement et sans expliciter le détail. Il s'agit néanmoins d'un implicite d'un autre genre, au sens où cette résolution demeure implicite non pas parce qu'elle est considéré évidente et accessible à partir des ressources fournies par l'enseignant, mais parce qu'elle n'est pas escomptée par l'enseignant. Les forces de frottement ne sont abordées dans la conversation qu'en réaction à leur mention par les élèves.

frottement supposée identique pour les deux balles, l'accélération varie selon la masse de l'objet en chute libre. Plus la masse m est grande, moins cette force de frottement aura d'effet sur l'accélération de l'objet en chute libre. Ainsi, à forces de frottements identiques, l'accélération $\overrightarrow{a}$ sera plus grande pour une masse plus grande.

Si les force de frottement sont prises en compte, la résolution algébrique de l'item #1 conduit à donner la boule de pétanque première à toucher le sol, comme dans les réponses non conformes escomptées par l'enseignant. Cependant, il convient tout de suite d'ajouter une nuance à ce résultat : la force de frottement de l'air exercée sur une balle de tennis ou une boule de pétanque a probablement un effet minime, de telle sorte que la différence de vitesse entre les deux balles est probablement très faible. Pour se rendre compte de l'importance de cette différence pour notre situation-problème, prenons un exemple avec des valeurs réalistes. Estimons la balle de tennis à 60g[411], la boule de pétanque à 600g et la hauteur de chute de 1,5 mètre (les balles sont tenues à bout de bras). Le frottement de l'air pour une sphère de rayon r se calcule selon la formule F_f=6 $\pi \cdot \eta \cdot$ r où η est la viscosité de l'air et vaut 1,81 x 10^{-5}, et r les rayons des balle de tennis et boule de pétanque, qui peuvent être considérés identiques et valent environ 0,066 mètres. Avec ces valeurs, on obtient une force de frottement de l'air F_f=2,25 x 10^{-5} N, soit une différence d'accélération entre les deux balles de 3,385 x 10^{-4} $\frac{m}{s^2}$, soit une différence de temps d'arrivée au sol sur une distance de 2 mètres de environ 27 millionièmes de secondes.

Discussion des résultats de la reconstruction des implicites

Du point de vue de l'enseignant, il paraît tout à fait raisonnable de négliger une telle différence de vitesse de chute entre les deux balles. Néanmoins cette décision ne peut être prise par les élèves, du moment qu'ils décident d'inclure le frottement, qu'*après* avoir fait le calcul avec des valeurs réalistes, et non sur la base d'une résolution algébrique. Or, les élèves n'ont jamais fait ce calcul, et même s'ils disposent dans leur formulaire de la valeur de la viscosité de l'air et de la formule permettant de calculer la force de frottement d'un fluide, il n'est pas certain qu'ils le savent, ni qu'ils aient les compétences pour s'en servir de manière autonome, du moment qu'ils n'ont pas eu l'occasion de s'exercer à des exercices portant sur les forces de frottement.

Du point de vue des élèves, c'est très différent de prendre cette décision en effectuant les opérations algébriques puis en calculant avec des valeurs réalistes que de croire l'enseignant déclarant que tous les objets tombent à la même vitesse. Dans le premier cas, ils construisent des connaissances opératoires et conceptuelles pour une classe de situation en physique, alors que dans le deuxième cas ils n'ont qu'une connaissance prédicative de la réponse à l'item #1. Plus problématique encore, le caractère contre-intuitif de cette déclaration d'une accélération constante des objets en chute libre est précisément souligné par le modèle enseigné, alors qu'elle résulte d'une décision portant sur la *valeur* de la différence, et non sur la différence elle-même, qu'un modèle plus complexe prenant en compte une force de frottement permet de justifier. Autrement dit, pour pouvoir décider que la différence d'accélération est négligeable, il faut bien

411. La masse d'une balle vaut entre 56,70 et 58,5 gr selon la Fédération internationale de Tennis.

commencer par admettre cette différence. Dès lors, la soi-disant "préconception" des élèves n'est pas même *erronée*, du moment que le frottement est inclus dans le modèle. Sur le plan logique, quelques millionièmes de seconde avant, c'est néanmoins *avant*[412]. En ce sens-là, la réponse à la question posée dans l'item #1 s'exprime en langue quotidienne par "la boule de pétanque touche le sol en premier", si on prend en compte les forces de frottement. Autrement dit, la "préconception" donnant la boule de pétanque première à toucher le sol peut être justifiée relativement au modèle mathématique utilisé, lorsque celui-ci inclut une force de frottement.

Usages logique, vectoriel et scalaire des termes dénotant des concepts

Cette analyse montre que la rationalité qui permet au physicien de décider si une valeur est négligeable ou non n'est pas strictement liée au modèle ou aux savoirs enseignés : des éléments contextuels sont à prendre en compte. Au vu de la reconstruction des implicites, le raisonnement n'apparaît plus comme un exercice purement déductif à partir des lois admises, dans un système fermé : il inclut les objectifs de la modélisation en tant que pratique. Si le millionième de seconde paraît insignifiant pour le temps que prend un balle à tomber, il peut avoir toute son importance dans d'autres circonstances, par exemple pour réussir l'envoi d'un satellite. Surtout, les critères qui président à cette décision sont *extérieurs* au modèle mathématique et, plus particulièrement, aux lois de Newton. La pertinence de l'ordre de grandeur du millionième de seconde dépend des finalités de la question ou du problème de physique. Or, cette finalité n'est pas spécifiée dans l'item #1. En effet, il n'y a pas de mise en scène ou de pratique sociale de référence à l'exercice qui permettrait pas de se référer à une situation concrète comme la construction d'un pont ou le calcul d'une trajectoire pour un satellite, à partir de laquelle la pertinence de 27 millionièmes de seconde pourrait être évaluée. C'est un problème supplémentaire que rencontre toute tentative de mise en œuvre d'une rationalité ouverte en milieu scolaire : les savoirs ayant été décontextualisés, les élèves ne disposent des références contextuelles permettant de déployer une telle rationalité.

En plus du problème de la décontextualisation de savoirs (Perret-Clermont, Brun, et al., 1982) cité ci-dessus, plusieurs significations correspondent aux signifiants dénotant des concepts, comme "accélération" ou "force". De nombreux chercheurs (voir p.ex. : Driver et al., 1985 ; Halbwachs, 1975 ; Halbwachs & Torunczyk, 1985 ; Ioannides & Vosniadou, 2002 ; Viennot, 1989a ; Weil-Barais & Lemeignan, 1990) ont souligné le fait qu'un terme comme "force" a non seulement une signification dans la langue courante et une signification scientifique, spécifique au modèle de Newton. Or, l'analyse ci-dessus nous permet d'observer[413] qu'un terme comme "force" fait également l'objet d'usages variés au sein même du modèle de référence : une terme comme "force" prend tantôt un sens *logique*, tantôt un sens *scalaire* ou encore *vectoriel*. Par exemple, dans la phrase suivante, je fais usage de "force" au sens logique[414] :

412. Comme le disait les Stoïciens "de même que celui qui, dans la mer, est d'une coudée au-dessous de la surface, n'étouffe pas moins que celui qui est plongé à cinq cents brasses, de même ceux qui approchent de la vertu sont dans le vice autant que ceux qui en sont loin ; et de même que les aveugles sont aveugles même s'ils doivent bientôt recouvrer la vue, de même les hommes en progrès restent des insensés et des méchants, jusqu'à ce qu'ils aient atteint la vertu", Plutarque, *Des notions communes contre les Stoïciens*, X (Schuhl, 1962, p. 142).

413. Je dois cette observation à un commentaire de Andrée Tiberghien, lors d'un échange sur les données de la recherche.

414. Je qualifie de *logique* l'usage du terme dans une schématisation orientée vers la valeur de vérité de l'énoncé et du raisonnement, comme quand il s'agit d'affirmer ou non une relation ou l'appartenance d'un élément à une catégorie (p.ex.

"Une seule force est exercée sur la balle en chute libre."

La formulation de la question de l'item #1 appelle une réponse qui fait un usage logique de la classe-objet {en premier}, ce qui m'a permis d'argumenter ci-dessus que la réponse donnant la boule de pétanque *première* à toucher le sol peut être justifiée, si l'on tient compte d'une force de frottement, quand bien même la différence de temps n'est que de quelques millionièmes de secondes. Au sens logique, que la boule de pétanque tombe quelques millionièmes de secondes avant la balle de tennis, c'est néanmoins *avant*.

Néanmoins, du point de vue de l'enseignant - et du physicien selon le contexte de son activité - ce millionième de seconde peut sembler insignifiant. Si l'expert se permet, à un moment donné de son raisonnement, de *décider* que la différence de temps de chute entre les deux balles de 27 millionièmes de secondes c'est *en même temps*, c'est parce qu'il fait un usage *scalaire* de la classe-objet {premier} : au concept correspond une mesure, une valeur. Cette valeur peut être considérée égale à une autre, moyennant la marge d'erreur intrinsèque à toute pratique de mesure : il s'agit d'un jugement d'égalité entre valeurs numériques, entre quantité, et non d'un jugement de valeur de vérité comme il est pratiqué en philosophie. Pour reprendre un exemple avec le signifiant "force", j'en fais un usage scalaire dans la phrase suivante :

"Quelle est la force de gravitation exercée sur la balle de tennis en chute libre ?"

En tout cas dans le contexte de notre recherche, cette question inviterait les élèves à donner pour réponse la *valeur* de la force de gravitation exercée sur la balle, en fonction de la masse de la balle en question. Elle invite à la mesure ou, encore plus vraisemblable, au calcul de cette valeur à partir de données numériques fournies dans la consigne de l'exercice ou les autres ressources à disposition (polycopié de cours, Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie 1985, etc.), comme par exemple la constante $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$. Or, nous avons vu que dans des exercices de ce genre, le résultat varie toujours un peu, notamment selon la quantité de chiffres utilisés après la virgules.

En outre, dans la pratique de ces exercices de résolution d'équations, qu'ils soient effectués par l'enseignant ou les élèves, la direction et le sens des vecteurs - objets de discours issus des mathématiques et utilisés pour désigner les forces, accélérations et vitesse au sein d'un modèle mathématique - sont le plus souvent laissés sous silence, sauf dans les cas particuliers où ils peuvent exercer une influence sur la détermination de la valeur recherchée. À ce moment-là, c'est un usage *vectoriel* des concepts qui est escompté, *parce qu*'il a une influence sur la valeur recherchée. Si ce mode de raisonnement s'apparente à du bon sens pour l'expert, il convient de remarquer que le novice n'est justement pas en mesure de décider si un usage *vectoriel* peut avoir un effet sur la valeur (usage *scalaire*) du concept *avant* de faire cet usage *vectoriel*, puisque c'est bien le résultat de cet usage vectoriel qui permettrait de décider qu'il est indispensable ou non.

"le cygne est blanc"). Cet usage est classique en philosophie, y compris en Philosophie de la Nature (en physique), avant que Newton ne s'en remette à des mesures plutôt qu'à des définitions verbales des concepts (Koyré, 1968).

Voici par exemple une phrase où un usage *vectoriel* du terme "force" est escompté :

"Effectuez la somme des forces exercées sur la balle de tennis en chute libre :"

Une "somme des forces" faisant un usage scalaire de "force" conduirait l'élève à des valeurs erronées dans bien des cas, et rendrait impossible toute situation statique d'équilibre des forces exercées sur un objet.

La distinction de ces trois usages du terme "force" peut être utilisée pour analyser les ressources sémiotiques (polycopié de cours, Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie 1985, consignes d'exercice, etc.). Par exemple, dans la schématisation de la première loi de Newton (voir figure B.33, p. 854), le concept de *force* est employé au sens logique : ce n'est que quand il n'y a *aucune* force - aussi minime soit-elle - qui s'applique sur la masse que le physicien est autorisé à prédire une trajectoire rectiligne uniforme avec conservation de la vitesse, ou un état de repos si celle-ci est nulle. Or, dans l'utilisation de cette première loi de Newton par les élèves au cours d'exercices, par exemple lors de la résolution de l'item #1, la réponse conforme aux savoirs enseignés escomptée par l'enseignant ignore d'éventuelles forces de frottement en raison de leur faibles valeurs numériques : cette réponse fait un usage *scalaire* de "force". De manière analogue, la force d'attraction exercée par la masse de la balle en chute sur la Terre est également ignorée du fait de sa faible intensité. Ainsi, pour s'approprier le concept de *force* à partir de l'énoncé de la première loi de Newton, de manière à pouvoir en faire usage dans un exercice exigeant la décision d'inclure ou non certaines forces [415], l'élève doit passer d'un usage *logique* de "force" à un usage *scalaire*, dénotant l'intensité, ou *vectoriel* de la *force*, usages ancrés dans un modèle mathématique de la force. Il y a donc un processus de modélisation qui permet ce passage de l'usage logique à l'usage scalaire ou vectoriel, qui demeure implicite dans la pratique d'enseignement étudiée dans cette recherche.

Cette manière de procéder est sans doute cohérente aux yeux du physicien, pour qui tout concept physique est *in fine* une mesure, mais l'apprenant doit d'abord acquérir une notion pré-métrique (Halbwachs & Bovet, 1980, p. 7 et 11) s'il veut construire une connaissance de la physique qui lui permette un usage en référence avec le monde réel. Sans cela, l'apprenant saura peut-être exécuter des calculs arithmétiques compliqués (en utilisant les termes désignant les concepts uniquement dans des usages *scalaires*), mais se trouvera en échec face à la tâche consistant à interpréter une situation-problème, et échouera au processus de modélisation.

Reprenons l'exemple de la boule de pétanque et de la balle de tennis en chute libre. Un calcul rigoureux de la durée des chutes des deux balles de la situation-problème #1 aboutit au résultat suivant : la boule de pétanque, plus lourde, touche le sol avant la balle de tennis de quelques millionièmes de secondes.

415. C'est bien le choix des forces à inclure ou non dans sa schématisation qui exige cette appropriation, et cela s'observe d'ailleurs facilement en classe : les élèves rencontrent fréquemment des difficultés justement dans cette partie-là de leur tâche. Nous y reviendrons à l'occasion de l'analyse de la pratique sémiotique que constitue le *dessin des forces* (voir situation #7, section 6.8, page 631 et suivantes.).

Face à ce résultat, la réponse à donner à l'enseignant dépend justement de l'usage *logique* ou *scalaire* de "force" par l'élève. Soit l'élève applique une logique de la preuve, visant à vérifier la valeur de vérité de la proposition P :"les deux balles touche le sol en même temps", et quiconque se prêtant à cet exercice avec une logique formelle arrivera à la conclusion que la proposition P est fausse, peu importe qu'elle soit fausse en raison d'une différence dans la durée de la chute de quelques millionièmes ou de plusieurs secondes. Soit l'élève réfléchit en physicien expérimenté, capable d'anticiper le peu d'importance de l'exercice de la force de frottement sur les balles, et décide pour se simplifier la tâche de considérer la situation comme si elle était dans le vide ou, autrement dit, décide de négliger les forces de frottement *en raison de leur faibles valeurs* pour arriver plus facilement à un résultat suffisamment exact pour répondre à la question. Il arrivera alors à la conclusion que les deux balles touchent le sol en même temps ou, devrait-on dire tout de même pour ne pas oublier la décision de négliger les forces de frottement, qu'elles arriveront au sol quasiment en même temps. Ce raisonnement, plein de bon sens, et même nécessaire à tout ingénieur confronté à la complexité de situations-problèmes réelles, ne va pourtant pas du tout de soi pour le novice. Cela devient même particulièrement complexe lorsque la conclusion d'un usage *logique* de "force" - à savoir que la balle la plus lourde touche le sol en premier - est justement considérée comme une préconception des élèves que la physique newtonienne devrait corriger... L'élève qui a bien compris tout cela pourrait s'exclamer : "*mais enfin, de quoi parle-t-on ?*"

Cette question me permet de conclure cette analyse des implicites à la situation d'interlocution portant sur l'item #1 en ouvrant la discussion sur les enjeux épistémiques de la tâche, que nous abordons à présent à travers sa construction historique par l'enseignant et dans les ressources empruntées à la littérature : justement, de quoi parle-t-on ? Pourquoi cet item #1, et pourquoi faire travailler les élèves sur cette question ?

6.3.6.2 Analyse de la construction de l'item #1 par l'enseignant

La reconstruction des implicites à la situation de malentendu analysée a soulevé la question, un peu provocatrice, du sens de la tâche adressée aux élèves : *de quoi parle-t-on ?* En particulier, les usages *logique*, *scalaire* et *vectoriel* des termes utilisés pour des concepts comme *vitesse*, *accélération* et *force*, mettent en évidence l'importance d'une intention communicative précise : au sujet de quoi souhaite-t-on communiquer avec les élèves dans la pratique de l'item #1 ? Cette question peut paraître banale, or il n'en est rien : quiconque soulève la question des objectifs d'apprentissage convoque, de fait, une réflexion épistémologique sur la nature des connaissances dont l'école vise la transmission, ce qui n'est ni banal ni aisé.

Pour tenter de répondre à cette question sans devoir ouvrir un chantier d'épistémologie de la physique, je propose une brève analyse de la construction de l'item #1 par l'enseignant, et partant du principe que les objectifs d'apprentissage et l'intention communicative décidée par l'enseignant sont, eux aussi, le résultat d'un processus de construction et d'interaction. En effet, l'enseignant n'est pas du tout isolé dans cette construction, puisqu'il part de ses cours de formation initiale à l'enseignement, de la littérature disponible

et d'autres interactions sociales (observation et conversation avec les collègues, etc.) pour construire sa séquence d'enseignement et, plus particulièrement, pour concevoir l'item #1.

Le point de départ : description d'une préconception dans la littérature

L'enseignant crée l'item#1 à partir d'un exemple dans une liste de *préconceptions* (Courtillot & Ruffenach, 2006) proposées aux enseignants pour construire des situations-problèmes en physique, dont l'extrait ayant inspiré cet item est reproduit ci-dessous dans la figure 6.17.

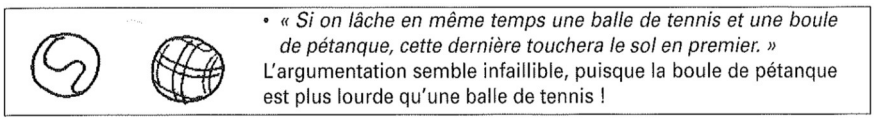

• *« Si on lâche en même temps une balle de tennis et une boule de pétanque, cette dernière touchera le sol en premier. »*
L'argumentation semble infaillible, puisque la boule de pétanque est plus lourde qu'une balle de tennis !

FIGURE 6.16 – Illustration présentant la préconception, (Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 215).

Dans l'ouvrage de référence, la préconception est donnée sous forme assertive "Si on lâche en même temps une balle de tennis et une boule de pétanque, cette dernière touchera le sol en premier". L'argumentation des élèves est évoquée avec ironie "la boule de pétanque est plus lourde qu'une balle de tennis", laissant l'analyse de l'erreur escomptée de la part des élèves complètement implicite pour le lecteur. Ce qui est présenté comme une préconception par les auteurs ne fait donc pas l'objet d'une analyse en mécanique. C'est l'enseignant qui fait le lien avec la mécanique, et en tire une forme interrogative pour l'item #1 : "Voici une balle de tennis et une boule de pétanque (de forme identique), laquelle touchera le sol en premier si je les lâche de la même hauteur ?". La formulation de la question par l'enseignant semble exclure la possibilité pour les deux balles de toucher le sol en même temps. Cela n'a cependant pas empêché près de la moitié des élèves de répondre que les deux balles arriveront au sol en même temps (10 réponses sur 23).

A partir de cet ouvrage, l'enseignant formule la question de l'item #1 et construit également une schématisation des réponses non conformes auxquelles il se prépare, suivant en cela la préconception décrite par les auteurs. Cette schématisation de l'enseignant d'une difficulté majeure des élèves lors de l'apprentissage de la mécanique est bien informée, et s'ancre dans une littérature des sciences de l'éducation déjà ancienne (voir p.ex. : Driver et al., 1985).

Épistémologie et modèle de l'enseignement

Néanmoins, si les auteurs s'accordent sur le phénomène, c'est-à-dire sur les difficultés constatées chez les élèves, l'interprétation du phénomène, par contre, donne lieu à des hypothèses variées et fait l'objet de débats. Pour une majorité des auteurs, les élèves ont des représentations mentales ou des conceptions antérieures à l'enseignement qu'il s'agit de dépasser (voir p.ex. : Carey, 1992 ; Giordan et al., 1994 ; Pellaud, Eastes, & Giordan, 2005 ; Vosniadou, 2007). Pour Viennot (1998, 2007), c'est le mode de raisonnement des élèves qui permet d'expliquer ces réponses, le recours à des *représentations* que les psychologues

attribuent aux élèves étant considéré par cette auteure comme inutile, et un manquement au principe d'économie dans la construction théorique. D'autres auteurs (Tiberghien, 2004 ; Tiberghien & Malkoun, 2007 ; Tiberghien & Weil-Barais, 1987) défendent l'idée que les élèves ont des modèles spontanés et des *conceptions intermédiaires* utiles aux apprentissages ultérieurs, plutôt qu'une opinion courante qu'il s'agirait d'éliminer. Notre analyse d'une situation de malentendu s'inspire à la fois du problème de théorisation soulevé par Viennot, et de la proposition de *conceptions intermédiaires* de Tiberghien et collègues, à la nuance près que nous analysons celles-ci en tant que *schématisations* partiellement divergentes, faisant référence à des constructions logico-discursives à un moment donnée du processus de communication entre enseignant et élèves, plutôt qu'en tant que *conceptions* faisant référence aux systèmes cognitifs individuels des élèves.

L'ouvrage utilisé par l'enseignant pour construire l'item #1 (Courtillot & Ruffenach, 2006), par contre, adopte clairement une interprétation faisant référence aux systèmes cognitifs individuels des élèves, et une approche pédagogique qui invite explicitement à "détruire" ces conceptions, se référant par exemple à Bachelard, mais aussi à des auteurs plus récents qui défendent cette approche (voir p.ex. : McCloskey, 1983 ; Wilkening & Lamsfuss, 1993). Dans cet ouvrage, le schéma reproduit ci-dessous par la figure 6.17 fournit une schématisation de l'épistémologie adoptée par les auteurs :

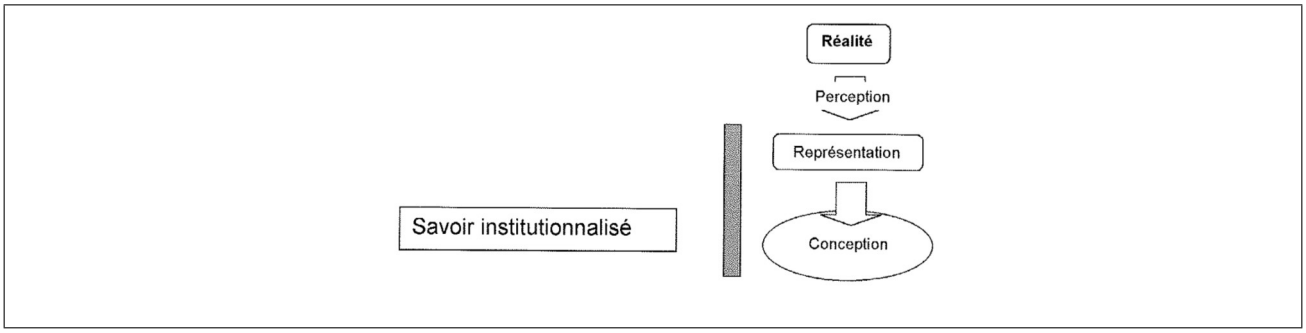


FIGURE 6.17 – Illustration présentant le modèle épistémologique des auteurs, (Courtillot & Ruffenach, 2006, p. 233).

Ce schéma part du principe qu'il y a une ligne de démarcation - la ligne grise épaisse sur l'illustration - entre le "savoir institutionnalisé" et la "conception" construite par un élève en observant la "réalité". Cette ligne de démarcation est probablement inspirée des philosophies sensualistes anglaises du $XVIII^{ème}$ et du $XIX^{ème}$siècle, qui font procéder les connaissances humaines plus ou moins directement des cinq sens. Ces perceptions seraient l'occasion de construction de connaissances partiellement fausses du monde physique (les "conceptions" sur le modèle, voir figure 6.17), que le "savoir institutionnalisé" (idem) peut corriger au cours du processus d'instruction [416]. Sans entrer dans une longue discussion épistémologique concernant ce modèle [417], je tiens néanmoins à souligner la ligne de démarcation pour le moins étrange entre "savoir

416. J'utilise le terme "instruction" ici pour désigner le processus de transmission des savoirs institutionnalisés représentés par ces auteurs, car c'est le concept qui correspond, historiquement, à l'approche pédagogique consistant à transmettre par le discours et les exercices des représentations savantes et vraies aux élèves, corrigeant leur ignorance naturelle. Il va sans dire que je ne souscris pas du tout à ce modèle pédagogique.

417. Il est évident que je prends distance avec un tel modèle épistémologique, qui nous replace plus d'un siècle en arrière, car depuis les travaux d'épistémologie génétique - pour ne citer que ceux-ci - il a été clairement établi que les connaissances humaines les plus complexes reposent sur celles que nous acquérons précédemment au cours du développement, même lorsqu'elles les modifient, dans une *construction* en *interaction* avec le milieu (physique, social, culturel etc.), et que le modèle

institutionnalisé" et "réalité", comme si les "savoirs institutionnalisés" n'étaient pas, justement, *au sujet de* cette "réalité" [418].

Il est surtout intéressant de souligner ici le fait que le modèle épistémologique détermine l'interprétation qui est faite des réponses des élèves : leurs difficultés sont d'emblée attribuées à des conceptions qu'ils auraient construites indépendamment de l'enseignant et de ses discours, dans un rapport individuel solipsiste à la "réalité" que leur permet leur "perception". Avant même la moindre enquête sur la nature de ces difficultés, le modèle épistémologique adopté fournit une explication à celles-ci. Cette explication a le mérite de ne laisser à l'enseignant qu'un rôle positif, et ce n'est pas le moindre mérite du modèle : l'enseignant *corrige* ces conceptions erronées fournies par le commerce naturel du rapport de l'individu avec la réalité qui l'entoure... Adopter ce modèle épistémologique a pour conséquence l'impossibilité de situations de malentendu : l'enseignant ne ferait que *réussir*, avec plus ou moins d'efficacité, *cette correction* des conceptions des élèves. Au pire, il ne se passe rien et les élèves conservent leurs "conceptions", au mieux l'enseignant leur a appris les "savoirs institutionnalisés".

Si je m'attarde sur ce modèle épistémologique, qui est aussi un modèle de la transmission des connaissances à l'école si largement répandu qu'il constitue une schématisation du sens commun, c'est justement parce que cette recherche permet de le mettre en défaut, en montrant qu'il existe des situations de malentendu, c'est-à-dire des situations où c'est précisément le processus d'enseignement qui est à l'origine de réponses jugées non conformes par l'institution scolaire ou l'enseignant.

J'ai montré que la conception de l'item #1 par l'enseignant est bien informée, ancrée dans la littérature destinées aux enseignants et part d'une épistémologie sous-jacente qui attribue, sans en faire l'enquête empirique, les difficultés à des "conceptions" acquises par les élèves au cours de leur développement. En montrant cela, je montre également que la situation de malentendu analysée ne peut être naïvement attribuée à quelque défaut ou accident dans la pratique de l'enseignant. L'enseignant fait non seulement son travail dans les règles de l'art, mais en plus il conçoit une séquence et des tâches à partir de la littérature. Le problème du sens de la tâche adressée aux élèves remonte au moins à cette littérature, voire jusqu'à l'épistémologie des $XVIII^{ème}$ et $XIX^{ème}$ siècles [419]. Cette épistémologie produit un modèle de sens commun de la transmission des savoirs à l'école, qui donne un rôle exclusivement positif aux enseignants : ceux-ci permettent l'acquisition des savoirs institutionnalisés ou, au pire, laissent les élèves dans l'ignorance correspondant à leurs "conceptions". Or, en montrant par l'analyse de situations de malentendu que les réponses jugées non conformes par le système scolaire prennent aussi leur origine dans la communication du système scolaire, de l'enseignant et des autres ressources à disposition, j'ai montré que ce modèle de sens commun est trop simple pour rendre compte des enjeux de l'apprentissage des élèves. Cette recherche contribue de cette manière à une épistémologie empirique, au sens où elle permet d'affiner la théorie de la

pédagogique consistant à imposer des savoirs institutionnalisés par le discours ou la mémorisation échoue généralement, les élèves ne parvenant pas à s'approprier ces savoirs s'ils ne sont pas aussi engagés activement dans leur construction.

418. On retrouve peut-être ici une caractéristique de l'idéalisme, dont la survalorisation des savoirs abstraits a conduit à des paradoxes théoriques pratiquement insolubles, comme la distinction entre *corps* et *esprit*.

419. Cette analyse de la filiation dans l'histoire des idées s'inspire de celle que fait Piaget dans ses travaux d'épistémologie génétique au sujet des biais de l'empirisme logique (Piaget, 1957), à laquelle je dois beaucoup des réflexions présentées ici.

connaissance à partir d'une enquête empirique sur la construction de ces connaissances dans un système social complexe comme l'école, plutôt qu'en se reposant sur un modèle philosophique pour l'explication des difficultés des élèves, qui renvoie l'entière responsabilité aux individus et aux biais de la perception humaine.

Cette analyse invite donc à réviser le modèle de l'enseignement qui consiste à attribuer des "pré-conceptions" aux élèves et un rôle dans la construction des connaissances des élèves strictement positif à l'enseignant, d'une part, et à reconsidérer l'épistémologie naïve que l'on trouve dans cette littérature, d'autre part.

Le rapport entre la construction historique des savoirs et les difficultés des élèves à l'item #1

Dans l'argumentation en faveur de ce modèle épistémologique que l'enseignant reprend de la littérature, se trouve également l'idée que les préconceptions des élèves correspondraient à des états désormais dépassés du développement de la physique. Or, les schématisations correspondantes des élèves pourraient aussi avoir pour origine l'enseignement lui-même. Par exemple, pour Oberle et al. (2005), la question utilisée dans l'item #1 du pré-questionnaire est une tâche qui permettrait de démontrer le *biais de Galilée*, à savoir un raisonnement biaisé que nous aurions tous et qui consiste au fait d'ignorer la résistance de l'air et de penser faussement que tous les objets tombe à la même vitesse" [420] (p. 643). C'est en procédant par analogie avec l'histoire des sciences que ces auteurs parviennent à cette interprétation, alors que dans notre étude de cas nous avons justement montré que c'est le curriculum, les manuels d'enseignement et l'enseignant qui invitent les élèves à ignorer la résistance de l'air, que l'enseignant finalement inclut dans sa schématisation en écoutant les propositions des élèves.

Dans l'extrait du mémoire professionnel de l'enseignant, l'erreur escomptée de la part des élèves qui est présentée comme semblable à une ancienne théorie documentée dans l'histoire des sciences consiste à donner la boule de pétanque comme première à toucher le sol parce que "la vitesse de chute est proportionnelle au poids" (extrait du mémoire professionnel, 408).

Dans ma démarche d'analyse, j'ai cherché à reconstruire le point de vue des élèves à travers la communication ayant lieu dans la situation spécifique où le point de vue de ces élèves est sollicité. Or, dans cette situation d'interlocution, "ignorer la résistance de l'air" et penser que "tous les objets tombe à la même vitesse" fonctionnent de manière antagoniste : en effet, prendre au sérieux la résistance de l'air devrait conduire à la conclusion que les deux objets ne touchent pas le sol en même temps, alors que le second va dans le sens d'une réponse en faveur d'une chute simultanée, parfois en raison d'une confusion entre force et accélération. Dès lors, plutôt que de rapprocher le raisonnement des élèves fournissant une réponse non conforme à un mode de raisonnement analogue chez Galilée, je suis tenté d'expliquer les difficultés des

420. Traduction de : "people ignore air resistance and falsely believe that all objects fall at the same rate".

élèves plutôt par l'effet de la scolarisation elle-même, à partir de ma démarche et des données analysées dans cette situation de malentendu [421].

Pourquoi cette explication des difficultés des élèves en termes de "conception" semblable à d'anciens modèles scientifiques est-elle si populaire auprès des chercheurs ? Mon hypothèse à ce sujet est qu'elle repose sur une idéologie du progrès, implicite au fait de considérer que les "savoirs institutionnalisés" postérieurs dans l'histoire des idées sont plus éloignés des "conceptions" individuelles construites au cours du développement et, en même temps, plus *vrais* [422]. Cette idéologie du progrès place sur une même ligne de développement les savoirs construits à diverses époques, ce qui a pour conséquence de passer sous silence les enjeux intellectuels de l'époque où ces savoirs sont élaborés, et la spécificité des projets intellectuels d'une situation sociale, culturelle et historique particulière. Cette idéologie du progrès induit un modèle de l'enseignement où les savoirs institutionnalisés de l'institution scolaire viennent remplacer les connaissances individuelles, à l'instar du processus historique où les savoirs plus récents, meilleurs, viendraient remplacer les savoirs plus anciens. Or, cette idéologie du progrès s'est révélée (récemment) insuffisante à rendre compte du processus historique de développement des savoirs spécialisés, notamment [423] depuis la reconnaissance du problème de l'oubli en sciences et de la perte des savoirs auquel nos sociétés post-modernes sont confrontées.

Désimbriquer l'enseignement de cette idéologie du progrès implique, pour l'analyse de l'item #1, de s'intéresser aux enjeux épistémiques de la question posée aux élèves à l'époque de Newton, et de les confronter à ce qui est fait de cette question dans la pratique scolaire. Cette mise en contraste peut contribuer à expliquer les difficultés des élèves tout autrement : plutôt que de supposer que les élèves passent par des étapes sur un seul et unique cheminement de développement, qui reprend à la fois leurs "conceptions" naïves et les savoirs de périodes historiques antérieures, l'enjeu de l'enseignement consiste à expliquer la *singularité de la perspective adoptée par Newton* - en lien étroit avec les préoccupations et moyens techniques et culturels de son époque - et de la distinguer de la singularité de la construction de connaissance spontanée dans laquelle les élèves sont engagés quand ils jouent avec les objets du monde physique. Cette démarche consisterait à situer la théorie newtonienne enseignée aujourd'hui dans le contexte et le processus qui a conduit Newton à la construire, et de concevoir les activités déléguées aux élèves à partir de cette enquête historique. N'ayant pas les moyens de mener à bien une telle analyse ici, je me

421. En outre, les auteurs cités ci-dessus qui adoptent une explication par les "conceptions" des élèves ne se sont pas donné les moyens méthodologiques d'observer ces effets de la scolarisation, tels que je les abordés à l'occasion d'incidents critiques dans mon corpus. Ceci expliquerait que cette hypothèse des préconceptions comme effets d'une scolarisation des élèves, aussi simple soit-elle, n'ait pas été proposée par ces chercheurs : elle a été éliminée d'entrée de jeu, par l'adoption d'une approche méthodologique aveugle à cette possibilité.

422. Ce terme mériterait une longue discussion ici : je me contente de signaler que mon objectif consiste à montrer que les savoirs élaborés au fil de l'histoire sont tous placés sur une seule dimension, comme s'ils répondaient tous à la même question - d'où ma référence à la vérité - plutôt que rapportés aux conditions historiques, culturelles et sociales de leur construction, parmi lesquelles nous trouvons des finalités différentes. Une épistémologie alternative à cette épistémologie unidimensionnelle qu'implique l'idéologie du progrès est proposée par Piaget (1967b) en tant qu'*épistémologie relationnelle* ou *dialectique*, ou par Bruner (1991a) en tant que *perspectivisme* (voir aussi : Hundeide, 1985).

423. D'autres raisons s'ajoutent à celle-ci, comme par exemple la perspective ethnocentrée qu'implique une telle idéologie du progrès, mainte fois mise en défaut par les travaux des historiens. Qui peut encore prétendre aujourd'hui que l'imprimerie a été inventée vers 1450 alors que les chinois la pratiquaient déjà près d'un millénaire auparavant ?

contenterai ici de quelques remarques permettant de situer les enjeux historiques des lois de Newton que les élèves sont invités à utiliser pour l'item #1.

L'item #1 fait partie des situations de mécanique classique visant à discuter de l'accélération d'un corps abandonné à lui-même. Ces situations ont permis à Newton de démontrer que sa théorie de la gravitation permet non seulement d'expliquer le mouvement des planètes, mais aussi le mouvement d'un corps (une masse) à la surface de la Terre. Le lien entre l'astronomie et la cinématique à la surface de la Terre est particulièrement important pour le problème du sens de la tâche adressée aux élèves, en particulier relativement au choix de considérer au non des forces de frottement. En effet, ce sont justement les situations de chute libre *sans considération des forces de frottement*, où un ou plusieurs objets sont lâchés, qui permettent de considérer que la force de gravitation s'exerce de manière identique sur les corps astronomiques que sur les objets à la surface de la Terre, par exemple sur la fameuse *pomme de Newton*. Pour Newton, ne pas considérer les forces de frottement est une opération *argumentative* : c'est l'occasion de relier le monde "sub-lunaire" et "supra-lunaire" par une loi générale, la loi de la Gravitation universelle (Koyré, 1966, 1968). Comment expliquer aux élèves un tel enjeu, sans reconstituer le débat historique et souligner la force argumentative de la comparaison entre la pomme *qui chuterait sans frottement à la surface de la Terre* et le mouvement de la Lune et des planètes ? En plus d'être un enjeu à l'époque historique de Newton, nous avons des raisons de penser que Newton avait aussi des enjeux épistémiques personnels dans son projet intellectuel, notamment un objectif métaphysique ou spirituel dans la réunion des mondes sub-lunaires et supra-lunaire par une loi commune : cela lui fournissait un argument en faveur d'une preuve de la présence de Dieu dans la Nature (Verlet, 1993). Nous sommes là fort éloigné des préoccupations des lycéens du $XXI^{ème}$ siècle, et cet éloignement nous paraît plus apte à conduire les élèves dans des difficultés d'interprétation qu'à produire un raisonnement analogue à Galilée, en particulier lorsque ces éléments historiques demeurent complètement implicites dans les pratiques conversationnelles de la classe.

Cette analyse de la construction historique de l'item #1 illustre l'influence sur la pratique de l'enseignant de l'idéologie du progrès, d'une épistémologie implicite inadaptée, et du modèle de l'enseignement qui en découle. Elle montre que la situation de malentendu est la résultante d'une histoire collective qui implique non seulement de nombreux acteurs (élèves, enseignants, auteurs de fiches ou de manuels, chercheurs, philosophes, etc.) mais également des intervalles temporels longs. Que ce soit par des pratiques traditionnelles établies dans une école, où par l'intermédiaire d'ouvrages, une situation de malentendu peut se constituer à partir de schématisations dont la construction remonte à plusieurs décennies, voire à plusieurs siècles.

Nouvelle hypothèse quant aux difficultés des élèves à l'item #1 : *un effet de scolarisation*

Notre analyse ci-dessus tend plutôt à montrer que même pour ces réponses bien documentées et généralement attribuées aux conceptions individuelles ou biais de raisonnement des élèves, la communication joue un rôle important, sinon crucial, dans le processus de construction des connaissances par les élèves. En

effet, la prise en compte du frottement ou non est déterminante pour la situation de malentendu analysée, et contribue à expliquer non seulement les réponses ambiguës analysées, mais aussi les réponses des élèves donnant la boule de pétanque première. Du point de vue communicationnel, il y a peut-être une cause commune au malentendu décrit ci-dessus et à la difficulté répertoriée dans la littérature, qui consiste au fait de *ne pas traiter les forces de frottement* dans l'objectif de relever que g est, dans ce cas, constante.

Il est tentant de faire l'hypothèse qu'à la stabilité des réponses de type "plus de poids, plus de vitesse" correspond la grande stabilité de la manière de présenter la physique newtonienne en contexte scolaire, qui consiste, notamment, à laisser les forces de frottement hors sujet par souci de simplification et dans le but de mettre en évidence une *constante naturelle*. Dès lors, plutôt que faire référence à des modèles scientifiques anciens, voire même à la manière dont le cerveau humain fonctionne (McCloskey, 1983), pour expliquer les réponses connues dans la littérature comme des "préconceptions", je préfère faire l'hypothèse d'une construction de ces schématisations d'élèves dans un processus dialogique de communication, à partir des spécificités de la schématisation traditionnelle des enseignants et manuels utilisés à un moment donné et dans un contexte particulier. Pour la situation analysée, ces spécificités tiennent plus particulièrement à ce que le frottement est exclu sans présentation explicite ni argumentation du caractère négligeable de son influence sur la vitesse de chute, et sans présentation de l'objectif historique de Newton, qui était de relier mondes sub-lunaire et supra-lunaire.

Rares sont les recherches qui investiguent avec suffisamment de détail les réponses des élèves pour pouvoir trancher entre ces hypothèses. La recherche de Tiberghien et Malkoun (2007) permet de le faire en identifiant à l'échelle micro des "facettes" dans les connaissances des élèves lors de deux séquences procédant avec des schématisations en mécanique réellement différentes. Les résultats mettent en évidence l'effet de la structuration des savoirs enseignés sur les connaissances acquises par les élèves au cours de la séquence : les difficultés traditionnellement constatées dans l'apprentissage de la mécanique sont significativement moins courantes dans la séquence nouvelle, mais d'autres difficultés apparaissent. Ainsi, dans les deux cas, les difficultés des élèves semblent effectivement qualitativement liées à la schématisation proposées par les activités de didactique des sciences proposées, et les schématisations construites lors de l'enseignement. Cela va dans le sens de notre hypothèse consistant à expliquer les difficultés des élèves comme étant fréquemment l'effet de la scolarisation elle-même, considérée dans cette recherche sous l'angle de la communication et à travers les incidents critiques que sont les situations de malentendu étudiées. Avant d'examiner plus en détail cette hypothèse explicative à l'aune de l'analyse de la situation g comme gravité, j'aimerais souligner qu'il s'agit d'une hypothèse "positive" au niveau de ses conséquences pédagogiques : elle va dans le sens d'une mise en évidence d'une plus grande influence des spécificités du milieu didactique, et en particulier des schématisations utilisées en classe, sur les apprentissage effectifs des élèves.

6.3.6.3 Éclairage quant aux difficultés des élèves à apprendre la physique

Introduction

Ce commentaire présente un discours argumenté en faveur d'une explication des difficultés des élèves à apprendre la physique à partir de l'analyse présentée [424].

Dans un premier temps, je présente la contribution de l'analyse de la situation de malentendu à une explication des difficultés des élèves concernés par la situation de malentendu. Cette première étape permet d'apporter quelques éléments de réponse quant aux enjeux épistémiques de l'item #1. Elle nous conduira à un questionnement quant à la relation qu'entretient l'émergence de cette situation de malentendu avec les spécificités de l'enseignement effectif, en particulier au niveau sémiotique. Dans un deuxième temps, j'examinerai ce que l'analyse de la situation de malentendu peut apporter à une discussion plus générale des difficultés rencontrées par tous les élèves dans la résolution de l'item #1, et en particulier des réponses attribuées par l'enseignant à une conception erronée, pour soumettre l'hypothèse d'un *effet de scolarisation* énoncée à la section précédente (6.3.6.2) à l'épreuve d'une analyse particulière, celle de la situation de malentendu *g comme gravité*.

Raisonnements inachevés et indifférenciation dans les schématisations des élèves concernés par la situation de malentendu

Le résultat de l'analyse d'un objet de discours (la classe objet {même force, même force de gravité, même force d'apesanteur}) a permis de décrire une situation de malentendu. Cette analyse met en évidence le caractère inachevé des schématisations des élèves, qui peuvent contenir des objets de discours indifférenciés. Quel éclairage peut-on jeter sur les difficultés des élèves engagés dans la situation de malentendu à partir de cette observation ?

Dans la littérature centrée uniquement sur la dimension cognitive, l'analyse de la justification de ces cinq élèves se fait parfois sous la forme d'une confusion entre accélération et force, au sens d'une erreur de raisonnement, où d'un apprentissage conceptuel incomplet où l'un des concepts est confondu avec l'autre. Notre approche communicationnelle, centrée sur l'usage de l'objet de discours plutôt que sur un référent conceptuel dans le système de représentation des individus, c'est par un *usage indifférencié* des objets de discours que nous avons identifié le malentendu, avec l'aide d'une analyse de pragmatique conversationnelle - c'est-à-dire de la manière dont cet usage répond à une question posée. Dans cette approche, nous pouvons expliquer ce qui apparaît comme une "erreur" - du point de vue d'un évaluateur des réponses des élèves - par un usage indifférencié d'un objet discursif : nous n'avons donc aucune raison de supposer une conception individuelle erronée d'un élève ou de plusieurs, le problème observé étant suffisamment expliqué en le ramenant à un usage plus grossier, moins différencié, d'un objet logico-discursif dans une interlocution

424. Il s'agit d'une essai d'explication que l'on peut refuser tout en acceptant l'analyse de la situation de malentendu en tant que telle. Il n'y a aucun lien d'implication stricte entre la démarche méthodologique qui a permis l'analyse de la situation de malentendu, et l'explication proposée dans ce commentaire, mais seulement quelques arguments en faveur de sa vraisemblance.

spécifique. En langage ordinaire, cela revient à dire que la réponse des élèves fait un usage trop grossier des instruments discursifs de la pensée, et plutôt que d'indiquer une pensée erronée, une conception à combattre, ces réponses sont l'indice d'une pensée inachevée, au sens que cette pensée n'a pas poussé *suffisamment*[425] loin la différenciation des objets.

Selon cette approche, la conclusion n'est pas que ces cinq élèves ont acquis un concept ou une conception erroné-e, mais plutôt que ces cinq élèves n'ont pas encore utilisé suffisamment[426] en détail les objets discursifs pour pouvoir déployer une pensée assez fine pour faire fonctionner le modèle enseigné. Autrement dit, ils se contentent d'un usage des objets de discours et de pensée plus vague, indifférencié, notamment parce que la tâche proposée n'oblige pas à un usage plus précis. Plutôt que de dire que l'opinion "pense mal", comme Bachelard, ou que les élèves ont des biais de raisonnement innés, comme McCloskey (1983), notre analyse nous conduit plutôt à faire l'hypothèse que *l'opinion ne pense pas, ou partiellement*. Cette paraphrase de Bachelard se focalise sur une nuance qui me paraît importante pour comprendre ce qui pose problème du point de vue des élèves. Plutôt que de considérer leur activité cognitive fallacieuse ("pense mal"), je la considère incomplète, c'est-à-dire qu'elle ne construit pas une schématisation suffisamment précise pour faire apparaître des contradictions exigeant une différenciation, puis une autre, et encore une, etc. Une raison de cet inachèvement de la pensée tient peut-être à ce que cette pensée se fait dans et par la conversation et que celle-ci, d'une manière ou d'une autre, est limitée, interrompue, partielle ou partiale, en fonction de la situation dans laquelle elle a lieu. Elle se trouve ainsi fréquemment interrompue, détournée ou subit diverses interférences qui lui sont internes ou externes (émotions négatives, interruption par la sonnerie, par des questions etc.).

Notre approche soulève une difficulté qui est rarement mentionnée en sciences de l'éducation : les élèves ont de la difficulté à *élaborer* et à *préciser* leur pensée, à *différencier* les concepts, à pousser leurs raisonnements au-delà du strict minimum. C'est une constatation à la fois banale - puisque le développement cognitif repose notamment sur un processus de différenciation - et potentiellement révolutionnaire en milieu scolaire, au sens où elle invite à considérer que ce n'est pas tant les réponses erronées qu'il faudrait considérer comme problématiques dans l'évaluation des apprentissages, mais l'*absence de réponse*, ou la réponse *superficielle*[427]. Autrement dit, une réponse erronée plus élaborée vaut peut-être mieux, dans le processus d'apprentissage des élèves, qu'une bonne réponse qui reste superficielle qui n'est que la répétition d'un discours que l'élève n'utilise pas pour penser par lui-même au problème transmis. Pour l'item #1, cela nous conduirait à valoriser davantage les réponses ambiguës analysées dans la situation de malentendu

425. Le jugement de ce qui est *suffisant* ou non dans une situation d'interlocution appartient en dernier ressort aux interlocuteurs ou, lors d'une analyse par une tierce personne, aux critères que celle-ci veut bien se donner, en fonction du cadre englobant cette situation, des représentations des interlocuteurs engagés dans la conversation, etc. Ici, les critères que j'ai utilisé reposent sur les contraintes et ressources à disposition des élèves pour réussir la tâche (voir Leplat et Hoc 1983) et sur les conditions de cette réussite (la réponse donnée et sa justification).

426. Selon les caractéristiques de la tâche, la "logique de l'objet" comme la nommait Piaget ou, quand il n'y a pas de rétro-action suffisamment clair quant au succès de la tâche, selon les attentes de l'enseignant ou du chercheur concernant cette tâche, c'est-à-dire de l'interlocuteur qui se pose en évaluateur.

427. Or, ces réponses superficielles sont souvent encouragées par les systèmes d'évaluation fonctionnant selon le principe de la *sanction normalisatrice*, conduisant les élèves à pratiquer leur *métier d'élève* en renonçant à comprendre par eux-mêmes (Perrenoud, 1994/1995).

que celles, conforme aux savoirs enseignés, qui consistent à donner les deux balles en même temps sans aucune autre justification.

Le corollaire de cette conclusion consisterait à définir la valeur de l'engagement cognitif de l'élève sur la tâche - sa performance - non pas en termes de réponses correctes ou conformes, mais en tant que *niveau de détail avec lequel il spécifie ses objets de discours* et dans *la longueur du mouvement qu'il effectue quand il déploie un raisonnement*. Autrement dit, c'est plutôt la *complétude* que la *conformité* des productions des élèves qui constituerait le critère d'évaluation de l'apprentissage effectué par les élèves, et qui permettrait de noter sa performance à une tâche.

Cette réorientation du regard sur la complétude plutôt que conformité répondrait également mieux aux objectifs de la pratique de l'enseignement. Du point de vue de l'enseignant, nous retrouvons des objectifs d'apprentissage implicites [428] portant sur une différenciation. Par exemple, la situation-problème [429] représentée dans l'item #1 est mise en contraste [430] avec une autre, où l'enseignant construit une schématisation dans laquelle l'accélération des objets varie selon leur masse. Il s'agit d'une situation-problème où les masses sont abandonnées sur une pente plutôt qu'en chute libre, ou lorsqu'ils sont à l'horizontal comme dans l'item #4 du pré-questionnaire. Lors de conversations avec les élèves durant les travaux de groupe, l'enseignant explicite parfois le rapport entre ces deux situations-problèmes dans le but d'enseigner aux élèves à distinguer ces deux cas de figure comme conduisant à des usages des savoirs enseignés spécifiques et distincts. Nous reviendrons sur cet exemple lors de l'analyse de la situation de malentendu #4, qui porte sur des réponses à l'item #4, et mettrons en évidence cet objectif d'apprentissage qui consiste à *différencier* des types de problèmes.

Au niveau de la pratique de recherche, cette réorientation me semble méthodologiquement plus rigoureuse. Le chercheur n'a aucune raison d'imputer aux élèves un raisonnement plus complet qu'il n'apparaît dans la schématisation : si le langage est outil de pensée, l'inachevé d'une schématisation peut nous renseigner sur ce qu'un raisonnement a d'inachevé sur le plan cognitif. Il s'agit d'être prudent dans nos hypothèses, puisque toute la pensée ne s'exprime pas dans le discours. Cependant, l'observateur externe - qu'il soit chercheur ou enseignant - attribue très souvent un raisonnement plus complet aux élèves à partir d'un indice, d'un mot qui évoque *de son point de vue* tout un raisonnement, ou des connaissances conceptuelles que l'élève n'a pourtant peut-être pas développées. À d'autres occasions, le chercheur ou l'enseignant s'étonne alors que la réponse de l'élève n'est pas cohérente avec la conception, le raisonnement ou même la théorie qu'il avait précédemment imputée à l'élève. L'analyse d'une situation de malentendu contribue à ce problème en inversant la direction d'ajustement, la "charge de la preuve" : plutôt que de déclarer l'élève incohérent avec lui-même, j'ai proposé de réviser les hypothèses quant à l'état de ses connaissances, et en particulier quant à l'état d'achèvement de son raisonnement. Autrement dit, ce qui est exprimé peut nous aider à comprendre *en quoi* le raisonnement d'un-e élève est inachevé, puisqu'il en

428. L'enseignant ne communique pas explicitement les objectifs d'apprentissage aux élèves, en tout cas pas dans les leçons enregistrées ni sur les polycopiés distribués.
429. Lorsque nous reprenons le point de vue de l'enseignant, nous utiliser ce terme pour désigner ce dont l'enseignant a souhaité la dévolution au cours du processus didactique, autrement dit le problème sur lequel il invite ses élèves à réfléchir.
430. Ce contraste est explicitement mentionné dans la correction à la phase 5 de la séquence, par exemple.

va du raisonnement naturel comme de la schématisation : ils sont toujours inachevés du fait qu'ils peuvent toujours être repris, continués et développés, ne constituant pas des systèmes fermés comme les modèles formels.

Cette réorientation permet d'établir un lien entre le domaine cognitif et les activités discursives. L'usage indifférencié d'une classe-objet peut être considérée comme une illustration au niveau de la pensée logico-discursive du processus de *différenciation* que Piaget et ses collaborateurs décrivent au niveau général dans les travaux d'épistémologie génétique, et illustrent surtout par des exemples d'acquisitions cognitives chez les enfants en interaction avec des objets concrets plutôt que symboliques. Nous retrouvons ici au niveau des interactions sociales par notre analyse de l'activité logico-discursive d'un malentendu, une forme de *différenciation progressive* telle qu'elle est théorisée en épistémologie génétique pour le développement cognitif général, mais portant sur *des objets de discours*. A ce qui est *indifférencié* au niveau cognitif chez Piaget, correspond un usage indifférencié dans l'interlocution d'un objet logico-discursif, une classe-objet, que l'expert, l'enseignant, distingue en plusieurs classes-objets dans ses interventions. Or, les termes linguistiques étant les mêmes, l'apprenant, comme le chercheur, ne dispose que des usages pour identifier ces différenciations, lorsqu'elles ne font pas l'objet d'un méta-discours explicite. Le processus d'apprentissage de l'élève à partir du discours de l'enseignant, comme l'analyse par le chercheur, ne repose que sur l'observation fine du discours de l'enseignant, des usages du discours et des ressources sémiotiques à disposition en relation à la situation d'interlocution. C'est en repérant les différences d'usage et en prenant la mesure de leur importance pour les savoirs enseignés que les difficultés du processus d'apprentissage de contenus symboliques complexes comme ceux de la physique scolaire peuvent être décrites.

Les signifiants utilisés par l'enseignant ne suffisent pas à *communiquer* les différenciations cognitives aux élèves[431], et ce sont plutôt les usages et les inférences pragmatiques en situation qui renseignent les élèves au sujet d'une telle différenciation. En effet, quand bien même l'enseignant utilise toujours la classe-objet {poids} dans le sens du modèle newtonien qu'il enseigne, les élèves peuvent tout-à-fait ne pas s'en rendre compte et continuer de l'utiliser comme un synonyme de {masse}. Il n'est dès lors pas étonnant, vu la complexité de la tâche d'interprétation, que des situations de malentendu apparaissent et qu'elles soient particulièrement difficiles à remarquer pour l'enseignant qui devrait, pour cela, procéder par le même type d'enquête que je propose dans cette recherche. Pourtant, j'ai pu montré dans l'analyse de cette situation de malentendu que la particularité qualitative de l'échec d'interprétation s'ancre dans des éléments spécifiques des interventions de l'interlocuteur, autrement dit que cette interprétation participe effectivement d'une co-construction d'une schématisation commune et que le malentendu consiste en une reprise partielle de la schématisation de l'enseignant. Dès lors, si l'enseignant ne peut certainement pas s'engager dans des enquêtes sur les situations de malentendu tout en enseignant, il peut prévenir ces situations en construisant une schématisation qui prévient les risques de situation de malentendu. Comment faudrait-il s'y prendre pour *prévenir* la situation #2 ? Répondre à cette question nécessite de revenir sur les éléments spécifiques

431. En effet, il est tout-à-fait acceptable d'avoir des synonymes, des signifiants différents et variés qui dénotent le même objet de discours, la même classe-objet, et signifie la même chose, à quelques connotations près. Ceci s'observe également en physique théorique, où par exemple le concept de *poids d'une masse* dénote le même objet de discours que la *force gravitationnelle exercée sur la masse*, pour le moins dans la plupart des situations.

de la schématisation de l'enseignant - et des manuels qu'il utilise - pour évaluer leur responsabilité dans la co-construction d'une situation de malentendu. Que trouve-t-on dans les interventions de l'enseignant qui s'interprète dans le sens du malentendu de ces cinq élèves ?

Des caractéristiques sémiotiques de la schématisation de l'enseignant propices à la situation de malentendu analysée

Pour répondre à la question soulevée ci-dessus, examinons dans un premier temps le polycopié de cours distribué aux élèves. Dans le polycopié reçu l'année précédente par les élèves, une page intitulée "La chute libre d'un corps dans le vide" (voir figure B.31, p. 831) introduit des équations de cinématique en commençant par schématiser une première constante : l'accélération des corps en chute libre dans le vide, abrégée "g et valant $9.81\frac{m}{s^2}$. Au même endroit, par contre, la schématisation écrite précise que "la valeur de cette accélération dépend à la fois de la pesanteur et de la rotation de la Terre" (*ibidem*) et donne pour exemple une valeur de "$9.78\frac{m}{s^2}$" pour l'équateur et de "$9.83\frac{m}{s^2}$" pour le Pôle Nord. Elle précise encore que cette valeur "est franchement différente" (*ibidem*) pour un autre astre, et donne comme exemple la valeur pour la Lune "$g_{Lune} = 1,6\frac{m}{s^2}$" (*ibidem*). Ailleurs, dans le polycopié distribué l'année précédente aux élèves, la valeur g est schématisée comme une accélération constante. Dans l'ouvrage de référence des élèves (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985), g ne se trouve pas dans la liste des "constantes physiques" (p. 186), mais est fournie comme une valeur variable définie comme suit : "$g = 9,780318\ (1 + 5,3024 \cdot 10^{-3} sin^2\lambda + 5,9 \cdot 10^{-6} sin^2 2\lambda - 3,15 \cdot 10^{-7} \cdot h)\ (m \cdot s^{-2})$" (p. 217), où λ est la latitude et h l'altitude.

Une autre page du polycopié distribué aux élèves l'année précédente, intitulée "le mouvement circulaire uniforme" (voir la figure B.32, p. 838, et la situation de malentendu #1), comprend un texte qui introduit une loi qui énonce le "module de la force gravitationnelle F" en langage mathématique, dans laquelle intervient une deuxième constante : la "constante de gravitation universelle", abrégée "G"et valant $6,67 \cdot 10^{-11}\frac{Nm^2}{kg^2}$". Cette constante intervient dans la définition d'une *force*, la *force de gravitation*. Il est néanmoins vraisemblable que les élèves la mettent en lien avec "g", qui, comme nous l'avons vu ci-dessus, désigne *l'accélération* constante des objets en chute libre à la surface de la terre lorsque les autres forces s'exerçant sur l'objet sont ignorées, à une latitude et altitude donnée. La vraisemblance d'un tel rapprochement ne repose pas seulement sur les signifiants proches, la lettre "g" majuscule et minuscule, mais aussi du fait de la tâche demandée aux élèves. Sur la même page intitulée "le mouvement circulaire uniforme" se trouvent deux exercices dont la consigne du second est : "Extraire l'expression de g et calculer sa valeur" (voir la figure B.32, p. 838 et la situation de malentendu #1). Il est intéressant de remarquer que "g" ne fait pas l'objet d'une schématisation verbale dans la consigne de cet exercice.

Dans le polycopié distribué aux élèves au cours de la séquence étudiée (voir figure B.34, p. 864), "g" réapparaît dans la définition algébrique du poids, et il est dit que "le poids en dépend". A partir de ces interventions écrites, les élèvent pouvaient différencier |FORCE| et |ACCÉLÉRATION|, et les signifiants "G" et

"g" ; mais[432] ils pouvaient aussi additionner les deux dans une notion indifférenciée |CONSTANTE, ACCÉLÉRATION, FORCE|, exprimée de manière synonymique par "G", "g", "force de gravitation", "pesanteur", etc.

Ce rapprochement entre les signifiants "G" avec "g" me semble propice à l'émergence de la situation de malentendu analysée, pour deux raisons :

— le fait de considérer g comme une constante interfère avec une modélisation de la chute libre qui fait usage d'un *dessin des forces* (voir section 6.8, p. 631) et encourage soit une réponse superficielle qui y fait directement référence à la constante sans se poser la question des forces exercée sur les balles, ni du rapport entre *force* et *accélération*, soit un mélange de cette notion |constante| et d'un raisonnement permettant de faire le *dessin des forces* comme on le constate par exemple chez Henriette (voir) ;

— le choix des lettres minuscule "g" et majuscule "G", choisies comme signifiants pour, respectivement, la valeur d'une *accélération* (g) et une constante intervenant dans l'expression mathématique permettant de calculer le module de la force de gravitation (G), prête à confusion ou, au moins, à une indifférenciation entre des unités de mesure (*accélération*, *force* ou autre chose) et ce d'autant plus que la lettre "g" évoque le mot "gravité", qui est une *force* et non une *accélération*.

Le fait que "g" est introduit à l'occasion d'une exercice consacré à la {force de gravitation} (l'exercice présenté sur la figure B.32, p. 838) et que la valeur de {g} est calculée à partir d'une équation dont résulte une force peut également constituer un ancrage à ce que la classe-objet {g} soit dénote une notion de |FORCE|, soit une notion indifférenciée |FORCE OU ACCÉLÉRATION|, de telle sorte que lorsque l'enseignant insiste oralement sur la valeur constante "g", de manière à sémantiser[433] {g ; constante}, ces cinq élèves sémantisent {g ; constante ; même force, même force de gravitation ; ...}.

Pour cette brève analyses des caractéristiques sémiologiques de la schématisation de l'enseignant qui sont propices à la situation de malentendu, je me suis essentiellement basé sur la schématisation de quelques pages du polycopié de cours (présentées dans les figures B.31, B.32 et B.34). D'avantage d'exemples de l'usage de g en tant que constante, de manière analogue à G, apparaissent néanmoins de manière fréquente au cours de la séquence d'enseignement dans le discours de l'enseignant. Nombre d'indices permettent de faire l'hypothèse d'un ancrage de la situation de malentendu dans la schématisation des savoirs enseignés par l'enseignant et ses ressources écrites. En ce sens, les difficultés d'interprétation des élèves, n'indiquent pas forcément leurs conceptions antérieures à l'enseignement, mais plus simplement le résultat de leur processus d'interprétation de la schématisation de l'enseignant dans une situation d'interlocution complexe

432. Des recherches (voir p.ex. : Bental et al., 1995) décrivent des "abstractions intermédiaires" qui additionnent ou agglomèrent ce qui est interprété par les chercheurs comme des conceptions personnelles et antérieures à l'enseignement, et des éléments de savoir acquis au cours de l'activité d'apprentissage.

433. Verbe utilisé pour dire "créer une nouvelle classe-objet dans sa schématisation", au sens d'une opération α.

invitant à des reprises de l'un des objets de discours principaux ("g") dans des usages différents de ceux escomptés par l'enseignant [434].

Au vu de la discussion ci-dessus, de nouvelles questions émergent : D'où viennent ces termes "g" et "G" ? Quel est la pertinence de ces choix sémiotiques ? Par exemple, pourquoi nommer l'accélération (soi-disant) constante des objets en chute libre dans le vide "g" alors que ce "g" ne représente justement pas la gravitation [435], et n'a pas le même statut épistémique dans la théorie newtonienne (il s'agit d'une *accélération* et non d'une *force*) ? Ce ne sont pas les termes d'origine, puisque des expressions métaphoriques comme "les corps s'attirent mutuellement", traduites du latin utilisé dans les débats de Philosophie de la Nature du $XVII^{ème}$ siècle ne sont plus utilisées. Grize s'est d'ailleurs intéressé à cette question au tout début de sa carrière académique, en publiant avec un collègue un manuel de physique pour l'école de commerce où il exerçait comme enseignant (Spichiger & Grize, 1955), qui faisait un usage complètement révisé des expressions symboliques de la physique en milieu scolaire. Il y avait choisi l'usage de lettres grecques (p.ex. α pour l'accélération) peut-être justement pour éviter *g comme gravité*.

Ce que l'analyse de la situation de malentendu éclaire des difficultés rencontrées par les autres élèves

L'analyse de cette situation de malentendu nous a permis de reconstruire la pertinence de la plupart des réponses des élèves qui apparaissaient ambiguës, en proposant des cheminements de pensée pour ces élèves qui rendent compte des réponses produites en fonction de la situation d'interlocution étudiée et de son contexte. Qu'en est-il des autres réponses des élèves ? En particulier, les cheminements ainsi reconstitués permettent-ils éventuellement d'éclairer les réponses non conformes, attribuées par l'enseignant et la littérature à des conceptions des élèves ? L'hypothèse d'un effet de scolarisation (voir section 6.3.6.2, p. 458) et-elle plausible dans cette situation de malentendu *g comme gravité* ?

L'analyse de la co-construction d'une schématisation commune autour de l'item #1 du pré-questionnaire a mis en évidence l'importance des forces de frottement, du point de vue d'une partie des élèves. Nous avons vu que plusieurs élèves entrent en négociation avec l'enseignant, pour que les forces de frottement deviennent un sujet de conversation, et invitent l'enseignant à accommoder sa schématisation à ce nouvel objet de discours. Par exemple, le groupe 💥 (explosion) écrit sur *Digalo* : "Dans la réalité la force de frottement joue un grand rôle". Ce groupe produit les réponses parmi les plus avancés de la classe, et comprend des élèves ayant des notes élevées en physique : ce n'est donc pas un point de vue qui se laisse facilement assimiler à une réponse farfelue ou à une conception erronée ou anecdotique. L'importance du frottement pour de nombreux élèves constitue, de mon point de vue de chercheur, un résultat secondaire et inattendu des analyses détaillées effectuées à l'occasion de la situation de malentendu. Même si ces analyses concernent d'autres réponses d'élèves, les cheminements du point de vue des élèves qu'elles nous

434. Meirieu (2005, p. 17) a cette phrase qui évoque la même idée : "dans le mouvement même du savoir enseigné qu'apparaissent, au plus intime de ce dernier, en ses plis les plus secrets, les obstacles à son enseignement".
435. De plus, la différence entre "g" et "G" est totalement inaudible, et l'enseignement se fait tout-de-même essentiellement par la communication orale.

a permis de reconstruire peuvent peut-être éclairer un mode de raisonnement utilisé par d'autres élèves et les conduisant à produire des réponses qualitativement différente.

Revenons sur les raisons qui me conduisent à considérer que la prise en compte ou non du frottement est un enjeu majeur de la situation d'interlocution autour de l'item #1. Premièrement, le frottement est un objet de discours introduit dans les échanges à l'initiative des élèves - ce qui est rare en contexte scolaire (voir ci-dessous, section6.3.6.4, p. 468 et suivantes) - et qui n'est que partiellement repris par l'enseignant dans sa schématisation, lors du discours oral conclusif sur la situation-problème de l'item #1 (voir section 6.3.3.1, p. 416). Deuxièmement, les forces de frottement jouent un rôle crucial dans la résolution algébrique du problème (voir section 6.3.6.1, page 442), en particulier dans la réponse erronée escomptée, attribuée à une "préconception" des élèves par l'enseignant dans son mémoire professionnel. En effet, lors d'une résolution algébrique du problème prenant en compte les forces de frottement, cette réponse erronée escomptée est confirmée par le modèle mathématique dès lors qu'une force de frottement est prise en compte : la boule de pétanque touche le sol en premier, quand bien même la différence de temps est minime.

Je propose d'examiner l'hypothèse d'une fabrication conversationnelle de l'erreur, c'est-à-dire la possibilité que le fait que ni l'enseignant ni les ressources à disposition des élèves ne proposent une solution à l'item #1 qui inclut le frottement (1) conduise les élèves à la situation de malentendu que nous avons décrite, et (2) contribue à des réponses correspondant à la conception erronée décrite par l'enseignant dans son mémoire, pour les raisons suivantes :

1. Les élèves peuvent s'engager dans une situation de malentendu parce qu'il n'est pas nécessaire de différencier *force* et *accélération* avec le calcul algébrique simplifié par l'exclusion de la force de frottement du système : les élèves peuvent passer directement de la force gravitationnelle à l'accélération constante des objets en chute libre à la surface de la terre.

2. L'exclusion du frottement dans le système considéré peut conduire les élèves à donner une réponse semblable à celle que l'enseignant attribue à une conception erronée, du fait que les élèves n'ont pas l'opportunité de se rendre compte qu'ils ont effectivement raison en proposant une différence en faveur de la boule de pétanque - la boule de pétanque touche le sol en premier - mais qu'ils surestiment cette différence quantitativement. Or, si ces élèves surestiment largement l'importance (la valeur scalaire) des forces de frottement qui freinent la boule lors de sa chute, il n'en est pas moins vrai, au sens strictement logique, que la boule de pétanque touche le sol en premier si l'on tient compte d'au moins une force de frottement.

Quand bien même il n'y a pas de quoi convaincre un enseignant d'accepter la réponse non conforme escomptée comme "correcte", la pertinence que peut prendre le frottement du point de vue des élèves est susceptible, de mon point de vue de chercheur, de remettre en question les explications souvent utilisées dans la littérature qui attribuent aux élèves des conceptions individuelles acquises avant leur scolarisation pour rendre compte de cette réponse, prétendument "naïve". Cette remise en question paraît d'autant

plus pertinente que, du point de vue des élèves, il n'est pas possible à l'élève de se faire une idée de l'importance ou non du frottement uniquement à partir d'un raisonnement algébrique, puisque c'est bien le résultat scalaire du calcul qui permet de juger de la grandeur d'une différence, et non l'équation en tant que telle, et que les élèves de la séquence étudiée ici n'ont jamais eu l'occasion d'en calculer cette valeur au cours des exercices proposés. Au contraire, l'enseignant semble plutôt les inviter à réfléchir à ces situations-problèmes du pré-questionnaire sans faire usage de valeurs particulières, uniquement à partir des rapports algébrique issus des lois de Newton.

La réponse des élèves attribuées à une préconception par la littérature et escomptée par l'enseignant comme réponse non conforme serait un effet de scolarisation au sens où c'est le processus de communication qui conduirait une partie des élèves à répondre ainsi à l'item #1 et conduirait l'enseignant à juger cette réponse non conforme, dans une structuration dialogique de la situation d'interlocution. Pour examiner cette hypothèse, il faut revenir plus précisément sur le modèle communicationnel de la situation d'interlocution que j'ai implicitement adopté pour pouvoir aborder les situations de malentendu en classe. Il s'agit de voir s'il est possible *en adéquation avec les observations effectuées jusqu'ici* de décrire un processus de fabrication conversationnelle de l'erreur courante des élèves, telle qu'elle est attendue pour cette situation.

6.3.6.4 La fabrication conversationnelle de l'erreur

Introduction

Dans l'analyse de *situations* de malentendu, j'ai procédé comme si la construction des connaissances des élèves était située dans un processus de communication au cours duquel l'enseignant schématise (au sens de Grize) les savoirs enseignés, que les élèves reprennent en partie ou pas du tout, de manière à pouvoir faire émerger une situation de malentendu où cette *reprise* par quelques élèves s'apparente à une accommodation déformante de la schématisation de l'enseignant. Ce modèle de la situation d'interlocution est inspiré de la pragmatique conversationnelle au sens de Ghiglione et Trognon (1993). Il n'avait pour autre but de permettre l'analyse de situations de malentendu. Néanmoins, au fil des analyses, il est apparu trop simple pour rendre compte du phénomène étudié et c'est pourquoi je vais revenir en détail sur les problèmes rencontrés, qui sont révélateurs de la complexité de la situation d'interlocution en milieu scolaire. Ceci nous fournira matière à discuter une éventuelle fabrication conversationnelle de l'erreur classique des élèves.

Le but de cette discussion est double : il consiste d'une part à soulever les problèmes que j'ai rencontré à l'usage du modèle de la situation d'interlocution que j'ai utilisé, de manière à obtenir un modèle moins naïf, et d'autre part à tirer les conséquences de ces problèmes pour décrire un éventuel processus de fabrication conversationnelle de l'erreur des élèves. En effet, nous verrons que la complexité de la situation d'interlocution à laquelle nous conduit cette discussion plaide pour une interprétation de la situation didactique comme d'un "jeu piégé" [436], où les erreurs habituelles des élèves correspondent justement aux

436. Il s'agit ici d'un clin d'œil à la théorie de Brousseau qui reprend justement la théorie des jeux en mathématiques pour modéliser les situations didactiques (mais la théorie mathématique part du principe que le jeu n'est pas truqué...), et qui ne

pièges conversationnels mis en évidence par l'analyse de la situation de malentendu. Cette piste explicative n'est que suggérée ici, à partir d'une étude de cas, mais elle pourrait être développé sous la forme d'un nouveau champ d'investigation : celui d'une *sémiologie scolaire* qui permettrait d'étudier de manière plus générale et dans des contextes variés la manière dont les pratiques et usages des signes et symboles conduisent tantôt au partage d'instruments sémiotiques, tantôt à des situations de malentendu où l'erreur des élèves est fabriquée par un vaste processus conversationnel qui piège le raisonnement naturel dans des voies sans issues, avant de leur être attribuée unilatéralement. Ces recherches permettraient d'investiguer dans le détail et pour chaque savoir enseigné, la fabrication conversationnelle de l'erreur et de son pendant positif, les connaissances acquises par les élèves, et d'établir peut-être quelques invariants de ce processus, voire son importance relative dans les difficultés et troubles d'apprentissage. Mais ce sont là des sujets pour d'éventuelles futures recherches.

Pour présenter le modèle implicite de la situation d'interlocution utilisé lors de mes analyses et en faire la critique, je vais procéder en trois temps :

1. Premièrement, je vais expliciter la place des interlocuteurs dans la situation, leur posture conversationnelle, car celle-ci est importante pour comprendre les finalités des échanges. La conversation étant une activité finalisée, il serait difficile de vouloir l'interpréter sans se poser la question de ses finalités selon les divers points de vue. Cette première question nous conduira déjà vers une nécessaire complexification du modèle, car nous verrons que la posture de l'enseignant, pour le moins, change au cours de la séquence et s'organise dans une structure hiérarchique de buts et sous-buts.

2. Deuxièmement, je vais expliciter le modèle de la situation d'interlocution utilisé pour examiner dans quelle mesure les schématisations de l'enseignant et des élèves sont effectivement *partagées*, ou autrement dit suffisamment semblables, pour être considérées communes. Nous verrons là aussi que la question est plus complexe qu'il n'y paraît, en particulier parce que les interlocuteurs sont au moins potentiellement dans une adaptation mutuelle constante.

3. Troisièmement, je chercherai à rétablir le lien entre le modèle de la situation d'interlocution *avec* les problèmes qu'il soulève sur le plan communicationnel, et la question cognitive de la construction des connaissances par les élèves. Cette dernière étape de la discussion me permet de suggérer un processus de fabrication conversationnelle de l'erreur sur la base de l'analyse de cette situation de malentendu, c'est-à-dire comme *un phénomène possible*. Si un tel processus devait être accepté en psychologie, les conséquences seraient importantes : il constituerait un processus de transfert du social à l'individuel, puisqu'il permet la fabrication d'une réponse individuelle jugée erronée ou d'une connaissance reconnue à partir d'une pratique collective de la conversation, et il constituerait une processus de construction cognitive (et méta-cognitive [437]) à partir des signes et de leurs usages,

considère un éventuel "piège" que comme un paradoxe indispensable à l'évaluation des élèves. Je ne suis pas de cet avis, mais plutôt de l'avis qu'il est justement incohérent, tant sur le plan cognitif que social, de vouloir enseigner et évaluer *en même temps*, du moment que l'une des deux finalités empêche l'autre par la manière dont elle structure la situation d'interlocution.

437. En effet, l'élève n'apprend pas seulement les lois de Newton, par exemple, mais il ou elle apprend aussi que sa manière d'employer ces lois est correcte ou, au contraire, qu'il ou elle "ne comprend rien en physique", pour reprendre la formule si souvent utilisée par les élèves eux-mêmes.

exemplifiant un mode d'apprentissage humain reposant sur la pratique et les usages de discours [438]. Enfin, il montrerait que la responsabilité de l'acquisition des connaissances par les élèves est partagée entre élèves, enseignants et tous les acteurs ayant intervenus dans la situation (auteurs des manuels de référence, scientifiques, philosophes, etc) puisque des détails comme le fait de ne pas parler de tel aspect du problème de physique peuvent, *in fine*, fabriquer une réponse erronée prise en charge par un élève à un moment donné des activités scolaires.

La place des interlocuteurs

D'une manière générale, les interlocuteurs occupent dans cette situation d'interlocution des places asymétriques, du fait qu'elle a lieu dans une institution scolaire. Les élèves disposent d'un statut inférieur, en référence à leur expertise moindre des connaissances dont la "transmission" constitue le motif de l'activité d'enseignement et d'apprentissage.

Dans la situation étudiée, cette asymétrie s'observe au niveau de l'alternance des places de locuteur et d'auditeur, et relativement à l'introduction d'un nouveau contenu dans la schématisation co-construite. C'est l'enseignant qui initie l'échange, c'est-à-dire qu'il est le premier à occuper la place de locuteur relativement à un nouveau sujet de conversation [439]. Il est rare en effet que ce soit un élève qui amène un problème sur lequel la classe travaille, et nous n'avons pas du tout observé ce cas de figure dans la séquence étudiée. L'échange se structure à partir de cette première proposition de l'enseignant, que les élèves peuvent ensuite reprendre voire, éventuellement, négocier - comme c'est le cas pour la question du frottement. En simplifiant, la place de l'enseignant consiste à proposer une première intervention pour la construction d'une schématisation commune, et celle des élèves à y participer selon des modalités plus ou moins définies [440] de manière à ce que l'enseignant puisse, ultérieurement, confirmer ou non que cette participation contribue effectivement à la schématisation commune. L'enseignant, par son statut, reçoit en conséquence la charge de confirmer ou non que les interventions des élèves constituent l'indice d'une compréhension adéquate de cette première intervention.

Plus spécifiquement à la situation d'interlocution étudiée, il convient de souligner la posture de l'enseignant qui propose une évaluation diagnostique à ses élèves plutôt qu'une évaluation formative ou sommative. En effet, la situation d'évaluation diagnostique implique une posture légèrement différente, puisque l'enseignant n'entre pas en communication dans une finalité de jugement des réponses émises par les élèves (comme c'est le cas pour les évaluations formatives ou sommatives), mais dans une finalité de

438. La compréhension de ce mode d'apprentissage "par instruction", aussi banale paraît-elle, est de plus en plus urgente aujourd'hui face aux critiques généralisées en sciences de l'éducation, et souvent sans nuances, de l'enseignement frontal alors que nous sommes loin d'en avoir expliqué la redoutable efficacité quand il fonctionne bien.

439. Certes, à un échelon plus micro, les élèves initient également des sous-échanges, par exemple lorsqu'ils posent une question. Nous examinons ici l'occupation des places, et donc l'initiation de l'échange, pour l'ensemble de la schématisation portant sur la première question du pré-questionnaire : de fait, cet échange résulte d'une question de l'enseignant. L'enseignant initie presque toujours une nouvelle schématisation, parce qu'il est institutionnellement responsable du sujet de conversation dans l'espace discursif de la classe, par son statut.

440. Dans cette situation, il s'agit d'écrire une réponse sur le pré-questionnaire, puis de la discuter en groupe et poster une réponse sur *Digalo*, et enfin d'écrire un "rapport expérimental" en groupe à partir de ressources techniques et matérielles pour effectuer des mesures.

compréhension, de description, éventuellement de catégorisation des réponses des élèves. En ce sens, l'asymétrie des statuts s'accompagne dans cette situation d'interlocution d'une posture *compréhensive* plutôt qu'*évaluative*[441]. Il convient d'ajouter immédiatement, par prudence, quelques remarques.

Premièrement, en analysant de la sorte la posture de l'enseignant en partant de ses déclaration d'intentions et de sa pratique du questionnaire - qui ne conduit effectivement pas à un jugement des réponses des élèves - je n'ai fait que montrer la posture que l'enseignant *propose* dans sa communication aux élèves. Ceux-ci sont libres d'interpréter cette proposition autrement, par exemple de ne pas adhérer aux discours, voire de ne pas croire que l'enseignant n'évaluera effectivement pas les réponses données. Il ne s'agit donc pas forcément d'une posture *effective* dans la communication entre l'enseignant et ses élèves, mais la posture *proposée* par celui-ci, dont il faudrait analyser pour chaque élève individuellement et au fil du déroulement de la séquence si elle est effectivement acceptée comme telle. En particulier, l'enseignant lui-même propose néanmoins une catégorisation articulant des réponses "justes" et "erronées" dans son mémoire professionnel pour chaque item du pré-questionnaire. Le rapport entre intentions, contrat de communication et usage effectif de cette "évaluation diagnostique" est complexe et mériterait une longue enquête. Les traces pour un tel travail nous manquent, parce que ce n'était pas l'objectif de cette recherche.

Deuxièmement, la posture proposée par l'enseignant lorsqu'il distribue le pré-questionnaire aux élèves est susceptible de changer au fil de la séquence, non seulement parce qu'il y a des risques que l'enseignant ne tienne pas cette posture de manière constante tout au long de la séquence, mais plus particulièrement parce que les 6 questions du pré-questionnaire sont reprises dans des phases ultérieures de la séquence avec de nouveaux objectifs du point de vue de l'enseignant. C'est ainsi qu'à la phase 4, lorsque l'enseignant reprend ces 6 questions en demandant aux élèves d'utiliser le matériel mis à disposition dans 6 postes d'investigation pour fournir une réponse justifiée par des mesures dans un rapport écrit, il ne s'agit plus de faire un diagnostic des conceptions des élèves, mais de confronter leurs conceptions à la réalité des expériences, notamment dans le but de les "mettre en défaut" lorsque ces conceptions sont jugées erronées par l'enseignant.

Ce point de vue de l'enseignant est explicité dans l'extrait ci-dessous :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p. 26-27

```
1  Dans cette activité, j'ai proposé à mes élèves des Travaux Pratiques de Sciences
2  Physiques inspirés du questionnaire. Toutes les situations du questionnaire sont
3  reproduites au laboratoire. Cette étape est délicate et tout à fait déterminante.
4  Suivant la manière dont elle est gérée, elle peut engendrer un découragement ou,
5  au contraire, une forte motivation qui donne une envie de relever le défi. Les
6  élèves réalisent une réflexion personnelle qui va permettre l'appropriation
7  de la situation et du problème, ainsi que la mise en place d'échange avec
8  émergence d'un questionnement, d'affirmations plus ou moins précises, de
9  constats, de désaccords, de confrontation d'idées, d'arguments. Les élèves
10 transforment leurs affirmations et le produit de leurs conceptions en
```

441. Même si dans l'expression "évaluation diagnostique" le terme "évaluation" apparaît, il n'y fait pas référence à la posture qui consiste à juger ou décider si les réponses des élèves sont correctes ou erronées, ou plus ou moins l'un ou l'autre, mais à activité concrète qui permet de stimuler des réponses d'élèves pour pouvoir les interpréter.

hypothèses avec l'obligation de les écrire. L'obligation d'écrire le résultat de la réflexion force l'élève à affronter l'obstacle de la verbalisation et à concrétiser le fruit de son travail, ce qui est très important. L'objectif didactique visé est la mise en défaut des conceptions "erronées" des élèves de façon probante. La démonstration doit être convaincante sinon la conception n'en sortira que renforcée!

Lors de cette phase 4 de la séquence, l'enseignant adopte une posture visant à convaincre les élèves (ou du moins une partie d'entre eux) à travers les dispositifs expérimentaux. Cette posture est également explicitée aux élèves avec des formulations laissant entendre que cette phase 4 arrive en dernier dans la séquence parce qu'elle permettra de mettre tout le monde d'accord sur une réponse commune. Par exemple, l'enseignant renvoie à plusieurs reprises au fil de la séquence les élèves demandant ce qui est "vrai" ou la "bonne réponse" aux "expériences" qui seront effectuées à phase 4 de la séquence.

Non seulement la posture de l'enseignant se modifie au fil de la séquence selon ses objectifs, alors que du point de vue de la pragmatique l'échange se poursuit sur le même objet conversationnel, mais il convient de souligner que ces postures sont organisées de manière hiérarchique. En effet, la posture compréhensive proposée aux élèves lors de la passation du questionnaire est subordonnée à la posture visant à convaincre les élèves (au moins ceux qui "pensent mal comme l'opinion", pour reprendre la citation de Bachelard par l'enseignant) à travers les dispositifs expérimentaux. Le but supra-ordonnée est de réaliser, en deux étapes, une *conversion*[442] des élèves s'inscrit dans une posture pédagogique plus générale à laquelle il se réfère sous le vocable "pédagogie constructiviste"[443] des élèves au modèle enseigné. Ce modèle d'enseignement sous la forme d'une conversion, par exemple dans l'extrait ci-dessous :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p. 12

Selon la pédagogie constructiviste; les savoirs dans le domaine scientifique ne peuvent pas être simplement transmis, ils doivent être reconstruits. L'enseignant tente de transmettre des informations qui parfois pèsent peu face aux connaissances subjectives déjà présentes chez l'apprenant. En effet, ces

442. Ce terme est ici utilisé comme concept de psychologie sociale (voir p.ex. Butera et Mugny 2001), pour décrire un type particulier de processus d'influence, qui est celui visé par l'enseignant pour les élèves à qui il attribue des conceptions erronées.

443. Je ne reconnais pas ici l'adjectif *constructiviste* utilisé par Piaget, par exemple, pour qualifier une théorie descriptive ou explicative, puisque le transfert du terme à une science interventionniste - la pédagogie - opère un glissement de sens problématique quant à ce qui, effectivement, se *construit*. Le *constructivisme* et *l'interactionnisme* de Piaget, que je reprends à mon compte dans ma posture de chercheur, qualifie la manière dont s'élaborent les connaissances des individus plongés dans un milieu (matériel, social, symbolique, etc.) : ce sont donc les connaissances des élèves en tant que réalités psychologiques qui *se construisent* (dans l'interaction avec le milieu), et elles sont construites par les élèves eux-mêmes. Ce qui est *constructiviste*, c'est une théorie expliquant la connaissance humaine (l'épistémologie génétique). Le vocable "pédagogie constructiviste" faisant référence à une intervention sur des connaissances d'élèves (déjà construites ?), il n'est plus question ni d'expliquer ni de décrire, mais d'intervenir sur les connaissances ou croyances des élèves dans un processus d'influence qui, à l'analyse, entretient un rapport complexe et ambiguë à la *construction* des connaissances par les élèves : est-ce l'enseignant qui *construit* les connaissances des élèves, comme le laisser parfois penser les ambitions de la "pédagogie constructiviste" en opérant un glissement de sens indéfendable ou, de manière plus subtile, s'agit-il d'une pédagogie visant à respecter le fait que l'élève *construit lui-même* ses connaissances en interaction avec le milieu ? Mais alors comment se réalise concrètement ce "respect" de la construction des connaissances par les élèves eux-mêmes ? Dans ce cas, pourquoi viser la conversion des élèves à un modèle donné et considérer d'emblée les connaissances *déjà construites* par les élèves des *conceptions erronées* ? Vu la complexité de ce débat, je préfère réserver le terme *constructiviste* à des théories ou modèles descriptifs ou explicatifs, la *prescription* d'une *construction de connaissance spécifique* me semble soulever trop de problèmes sur le plan théorique pour acquérir un sens précis.

```
dernières sont liées à l'expérience personnelle du sujet alors que les
informations lui sont extérieures. Les élèves les recombinent alors de façon
spécifique et construisent leur propre système explicatif du monde. L'enseignant
peut éventuellement programmer son enseignement, mais il ne peut pas en aucun
cas programmer les apprentissages de ses élèves. En effet, la décision, la
possibilité d'apprendre appartiennent à celui qui apprend et personne ne peut
le faire à sa place. L'enseignant s'efforcera donc de créer les conditions
favorables afin que l'élève se construise lui-même.
```

Le rapport entre l'adoption explicite d'une posture "constructiviste", sa définition théorique et sa mise en oeuvre effective est également un rapport complexe qui mériterait une recherche à part entière, qui pourrait notamment reposer sur une analyse détaillée des changements de posture au cours de la séquence. Comme ce n'est pas l'objectif de cette recherche, j'en reste à ces quelques remarques au sujet de la posture proposée par l'enseignant et son évolution au fil de la séquence pour souligner et mettre en évidence quelques éléments de la complexité de la structuration progressive de la situation d'interlocution analysée.

Le partage des schématisations entre enseignant et élèves

Comment peut-on savoir dans quelle mesure les schématisations construites par les locuteurs au sujet de l'item #1 sont-elles effectivement partagées ? Selon Trognon et Larrue (1988b), trois interventions sont nécessaires, au minimum, pour établir un partage explicite entre les interlocuteurs : il ne suffit pas que la première intervention soit reprise par l'interlocuteur (deuxième intervention), car celle-ci pourrait ne pas être reconnue comme une reprise des intentions de l'énonciateur de la 1ère intervention. Seule une troisième intervention, par le premier énonciateur, peut confirmer le caractère partagé de l'énoncé de la première intervention, car elle fournit l'indice d'une reconnaissance de la validité de la reprise. Peut-on utiliser, pour l'analyse de situation d'interlocution en milieu scolaire, une modélisation de l'échange à l'aide de ces trois interventions ?

Le format en trois interventions est un classique du milieu scolaire, mais plutôt en tant que format de "cours dialogué" ou format de discussion en classe plénière. Dans ce format que Mercer (1995, p. 29) désigne par *I-R-F* ("Initiation - Response - Feedback"), l'enseignant pose une question à la classe (c'est l'*initiation* de l'échange), un ou une élève répond (c'est la *réplique*[444]), puis le retour de l'enseignant (c'est le *feedback*) confirme ou non la réponse donnée. Une traduction de "feedback" pourrait être *quittance*, au sens où la troisième intervention permet de *quittancer* ou valider la réplique, mais aussi au sens où elle permet de *quitter* l'échange, de le clore, voire parfois au sens où elle permet aux interlocuteurs de se considérer comme *quittes* l'un l'autre, ayant eu par exemple accès à la parole chacun à son tour. Ce que la pragmatique conversationnelle apporte à cette structure, utilisé chez Mercer comme un format de dialogue, c'est son usage pour déterminer si et quand les interlocuteurs partagent explicitement un discours. Qu'elle

444. Le terme *réplique* me semble mieux traduire *response* que *réponse*, car l'*initiation* de l'échange n'est pas forcément une question, au sens grammatical ou pragmatique du terme, et l'anglais *response* s'approche davantage d'une *réaction*, quelle qu'elle soit, que du sens stricte de *réponse à une question*.

que soit la forme que prend cette *quittance*, elle ne remplit son rôle de confirmation d'une schématisation partagée quant à l'*initiation* énoncée que si, d'une manière ou d'une autre, elle permet de valider que la réplique est bien une réplique valable à l'initiation précédente. Que faut-il entendre par "valable" dans ce modèle ? Trognon et Larrue (1988b) reprennent la théorie des actes de langage pour distinguer deux niveaux auxquels un énoncé *réplique* au précédent : l'un ayant trait à la *réussite* de l'acte de langage, l'autre à sa *satisfaction*. Fournir une réponse à la question posée, par exemple, satisfait les intentions illocutoires (de poser une question), mais ne réussit pas si le contenu de la réponse n'est pas aussi considéré "correcte", dans le contexte scolaire.

Voici en quelques lignes le modèle que j'ai implicitement utilisé pour vérifier si une schématisation est effectivement partagée par les interlocuteurs dans l'analyse des situations de malentendu. Ce modèle *initiation - réplique - quittance* permet-il une analyse pragmatique des échanges en classe de manière à décider s'ils sont partagés, même si les moments effectifs où les trois interventions apparaissent au cours des activités communicationnelles sont disséminés ?

Par exemple dans l'analyse de la situation de malentendu développée ci-dessus, j'ai procédé de la sorte en sélectionnant au cours d'une séquence de trois mois les moments où les élèves répondent à la question posée par l'item #1 du pré-questionnaire au début de la séquence (l'*initiation*), et considéré que la troisième intervention (la *quittance* des *répliques* des élèves) était effectuée par l'enseignant tout à la fin de la séquence lors de la séance conclusive. Voici ce que donne l'usage du modèle *initiation - réplique - quittance* pour la situation de malentendu #2 :

— l'**initiation** est la question écrite du pré-questionnaire (item #1) adressée aux élèves par l'enseignant, qui est à l'origine de l'échange et comprend non seulement une question écrite au niveau verbal, mais également un schéma graphique faisant partie intégrante de l'initiation ;

— la **réplique** est toute intervention d'élève, sous la forme d'une expression écrite sur le pré-questionnaire rendu à l'enseignant ou à l'oral lors des échanges qui apparaissent au cours de la séquence, à condition qu'elle constitue effectivement une réponse à la question de l'item #1 ;

— la ou les **quittance**(s) des répliques des élèves sont les interventions que l'enseignant adresse aux élèves et qui portent sur l'une ou l'autre de leur réplique ou, à l'adresse d'un interlocuteur généralisé représentant toute la classe, qui portent sur la *réplique* qu'il fallait faire à l'*initiation*.

Comme l'exercice conversationnel proposé aux élèves dans la situation d'interlocution analysée n'est pas de répéter ce que l'enseignant a affirmé plus tôt, mais de répondre à une question, ces *quittances* devraient permettre de décider non seulement si les *répliques* des élèves répondent bien à la question posée par l'enseignant, mais aussi si elles constituent des réponses pertinentes du point de vue de l'enseignant (c'est-à-dire autant sur la réussite que la satisfaction de *l'initiation*). Pour cela, il nous faut cependant encore un modèle du *partage* d'une schématisation. Grize (1995) propose trois niveaux de partage d'une schématisation : *recevoir* la schématisation, l'*accepter* et y *adhérer*. La question se pose dans les deux

sens, évidemment : les élèves ont-ils reçu, accepté ou adhéré à la schématisation de l'enseignant et - à l'inverse - l'enseignant a-t-il reçu, accepté ou adhéré aux schématisations des élèves ?

L'usage de ce modèle rudimentaire du processus de communication en classe conduit immédiatement à faire deux remarques, notamment en raison de la distribution des moments de l'échange présentée ci-dessus :

1. Premièrement, le fait de choisir une réponse d'un-e élève pour établir un échange conduit à multiplier ces échanges par le nombre d'élèves répondant au pré-questionnaire. En effet, la situation d'interlocution est telle que l'enseignant initie, avec une première intervention unique, autant d'échanges parallèles qu'il y a d'élèves dans la classe.

2. Deuxièmement, et notamment en raison de la première particularité décrite ci-dessus, la triade *initiation - réplique - quittance* qui permettrait de décider si la schématisation est partagée dans le processus de communication étudié ici, ne se déroule pas de manière ordinaire comme dans une conversation entre deux interlocuteurs. Dans cette situation de travail écrit sur questionnaire, l'enseignant aurait pu redonner à chaque élève un commentaire sur sa réponse qui aurait effectivement conduit à 23[445] échanges de trois tours de parole. Or, ce n'est pas le cas : la quittance de l'enseignant ne prend pas la forme de 23 commentaires différents adressés à chaque élève individuellement mais, comme c'est souvent le cas dans la pratique scolaire, elle prend surtout la forme d'une intervention unique adressée à l'ensemble des élèves. Ce sont donc les élèves qui ont la responsabilité de décider si cette intervention *quittance* ou non la réponse qu'ils ont donné individuellement[446]. Par conséquent, il n'y a pas d'appariement précis entre des répliques particulières d'élèves et la quittance de l'enseignant, puisque cette dernière n'est pas adressée individuellement. Plus complexe encore, l'intervention unique adressée à l'ensemble des élèves ne garantit pas que toutes les répliques des élèves, dans leur diversité, soient effectivement quittancées : l'enseignant pourrait bien en oublier ou en laisser sans réponse.

Le processus de communication étudié est donc plus complexe qu'une interaction verbale entre deux interlocuteurs, telle qu'elle est souvent utilisée comme exemple dans la littérature de pragmatique conversationnelle. En effet, dans l'échange analysé ici un certains nombre de caractéristiques varient au cours de l'échange. Trognon et Larrue (1988b) attirent l'attention sur le fait que le nombre d'interlocuteurs peut être une variable plutôt qu'une constante dans certaines situations d'interlocution. C'est le cas ici, puisque l'enseignant s'adresse avec une seule intervention à 23 élèves et reçoit 23 réponses, auxquelles il réagit tantôt lors d'échanges avec des petits groupes d'élèves, voire individuellement, et tantôt avec la classe entière comme s'il s'adressait à un seul interlocuteur. De plus, les supports utilisés pour la communication - notamment l'oral et l'écrit - et les modes sémiotiques utilisés - des schémas, du langage mathématique ou français - varient également. En outre, ce qui apparaît dans la pragmatique comme des *interventions*

445. Parmi les 25 élèves de la classe, 23 ont répondu au pré-questionnaire, les autres étant absents pour diverses raisons.
446. À cette réponse unique en fin de séquence s'ajoutent néanmoins quelques discussions orales avec quelques élèves au cours de la séquence, mais vu l'adoption d'une posture compréhensive par l'enseignant lors de ces activités, *quittancer* les *répliques* des élèves n'est justement pas le but de ses interventions.

ou *tours de parole* ne sont pas toujours clairement identifiables dans cette situation d'interlocution : faut-il par exemple considérer une intervention le fait d'écrire une réponse au pré-questionnaire ? À quel moment est-elle située, le moment où elle est rédigée par l'élève ou au moment où elle est lue par l'enseignant ? Peut-on traiter le discours de l'enseignant à ce sujet trois mois plus tard comme si c'était une *quittance* qui suit directement la *réplique* ?

Ayant souligné ces limites du modèle, tentons néanmoins l'exercice pour voir si d'autres problèmes apparaissent. Pour le point de vue des élèves, je me limiterai à discuter du degré de partage de la schématisation pour les élèves concernés par la situation de malentendu. Dans l'analyse de la situation de malentendu *g comme gravité*, nous avons soutenu l'hypothèse que certains élèves utilisent une classe-objet similaire bien spécifique, dans l'intention interlocutoire [447] de reprendre de la schématisation de l'enseignant une notion, quelque chose comme |INVARIANT, g|, notamment parce que l'usage qu'ils en font montre qu'ils ont reconnu son importance pour répondre à la situation-problème proposée. Cela signifie, en regard à la théorie de la communication de Grize, que les élèves concernés ont bien *reçu* la schématisation de l'enseignant, au sens où il définit *recevoir*. Néanmoins, la schématisation enseignée, en particulier autour de la notion |INVARIANT, g|, conduit ces élèves à reconstruire une classe-objet du discours de l'enseignant de manière partielle, de telle sorte qu'elle donne lieu à une situation de malentendu. Ils n'ont donc pas tout-à-fait *accepté* la schématisation de l'enseignant, au sens où elle est renégociée par ces élèves.

Du point de vue de l'enseignant, la discussion du degré de partage de la schématisation avec les élèves est plus complexe, car la situation de malentendu entretient des liens étroits avec la manière dont l'enseignant procède justement pour quittancer les répliques des élèves. Autrement dit, l'enseignant dispose de son propre modèle (implicite) de la communication pour décider, au moment opportun, de la quittance d'une réplique d'élève ou non. Je discuterai donc non seulement du partage de la schématisation de l'enseignant selon son point de vue avec les élèves participant à la situation de malentendu, mais aussi avec les autres élèves.

Les réponses assimilées par l'enseignant à la schématisation qu'il propose, comme la réponse de Urs lors de la correction de l'item en fin de séquence (voir p. 416), sont non seulement évaluées comme correctes, mais permettent également à l'enseignant de confirmer que la schématisation est partagée. Autrement dit, l'enseignant non seulement *accepte* ces réponses, mais y *adhère* (il aurait pu donner ces réponses lui-même aux élèves). En ce sens, une réponse comme celle de Urs constitue simultanément une confirmation pour l'enseignant que l'élève a compris la question, c'est-à-dire que sa schématisation peut être acceptée par au moins une partie des élèves, et une confirmation que l'élève a compris le modèle enseigné, c'est-à-dire qu'au moins une partie des élèves peuvent adhérer à sa schématisation - autrement dit qu'il est parvenu à enseigner [448]. Le succès de cette réplique *dans son ensemble* acquière, dès lors, une valeur spécifique en milieu scolaire, où l'enseignant s'autorisera probablement à attribuer à l'élève

447. Nous nous permettons de faire l'hypothèse de cette intention parce qu'elle permet de rétablir la pertinence des interventions des élèves dans la situation d'interlocution donnée et en fonction du contexte scolaire de l'activité étudiée.

448. Cette dernière inférence va un peu trop vite, même si elle est couramment effectuée dans la pratique, car il faudrait encore montrer, pour établir que l'enseignant a effectivement *enseigné* cette schématisation, que l'élève n'y adhérait pas déjà auparavant...

des représentations individuelles (ou conceptions) correctes au sujet de la matière enseignée. Brousseau (1998/2004) souligne ce rôle évaluatif de l'implicite dans sa théorie des situations didactiques. Cette double confirmation pose un problème classique en milieu scolaire : l'enseignant n'évalue pas l'un sans l'autre. Autrement dit, il est difficile, voire impossible de distinguer les compétences à comprendre la question de celles permettant de produire la réponse en faisant usage d'un raisonnement et de connaissances spécifiques aux savoirs enseignés. Le succès conversationnel ne peut être distingué, du point de vue de l'enseignant, du succès cognitif de la conversation. J'y reviendrai par la suite.

L'approche centrée sur les préconceptions vise justement à faire la différence entre ces compétences en schématisant également les réponses erronées. Les réponses facilement assimilables aux difficultés que l'enseignant schématise comme un mode de raisonnement ou une opinion associant poids et vitesse, conduisent l'enseignant à confirmer une bonne compréhension de la question, et à considérer cette partie-là de la schématisation comme étant partagée, puisque les difficultés font partie de sa schématisation des conceptions erronées. Dès lors, il quittance partiellement les réponses qui ne sont pas conformes au modèle enseigné mais répondent néanmoins à la question posée lors de l'*initiation* : elles *satisfont* les intentions illocutoires de la question posée par l'enseignant, mais celle-ci ne *réussit* pas, elles sont *acceptées* par l'enseignant - en tant que réponses erronées - sans qu'il y *adhère*, puisqu'elles sont jugées non conformes [449] à son enseignement.

Qu'en est-il des réponses des élèves concernés par la situation de malentendu, que nous avons qualifiées d'ambiguës ? Il semblerait que l'enseignant n'entre pas en matière sur ces réponses, et le format de sa *quittance* - un discours général adressé à tous les élèves en même temps - lui permet justement d'éviter de le faire. Dans cette hypothèse, il faut reconnaître que ces réponses *ne* sont *pas acceptées* par l'enseignant : elles ne font pas partie de la conversation. Peut-être sont-elles *reçues*, au sens où l'enseignant les a entendues, lues, et décodées, mais elles ne sont pas adressées lors de la discussion qui *quittance* les *répliques*, et sont donc exclues des *répliques acceptées* pour *quittance ou non*. Peut-être *ne* sont-elles même *pas reçues*, au sens où les indices discursifs laissés par les élèves apparaissent trop énigmatiques à l'enseignant pour lui permettre le décodage préalable à leur interprétation.

Une dernière question mérite encore notre attention : en quoi la schématisation de l'enseignant se modifie-t-elle au fil de la séquence ? L'adaptation de la schématisation de l'enseignant au cours de la si-

449. Même si ce modèle permet d'évaluer *grosso modo* le niveau de partage de la schématisation sur l'ensemble de la situation, notamment du fait que la situation d'interlocution invite les élèves à fournir des réponses à plusieurs moments de la séquence à la question #1 du pré-questionnaire, il convient de faire une remarque concernant les traces disponibles. En effet, les enregistrement audio et vidéo et les réponses écrites sur *Digalo* qui constituent les traces des réponses des élèves à cette question après leur réponse écrite individuelle sur le questionnaire sont presque toujours des interactions entre élèves, c'est-à-dire que les contributions à la construction de la schématisation commune de la physique sont elles-mêmes déjà les résultats de la co-construction d'une schématisation plus ou moins partagée par le groupe. Il serait par conséquent peu adéquat de partir de ces traces pour tenter de reconstruire les points de vue individuels des élèves, sans mener une analyse supplémentaire de la contribution de chaque élève au sein d'un groupe. Une telle analyse est particulièrement complexe, puisqu'elle exige de prendre en considération non seulement les interventions dans le processus de communication mais également les dimensions sociales des échanges, par exemple les statuts des élèves au sein du groupe en fonction du niveau d'expertise dans la matière scolaire, du genre (Psaltis & Zapiti, 2014), etc.

tuation analysée se limite à une reconnaissance que le frottement pourrait être pris en compte [450], sans pourtant discuter explicitement du choix lui-même de prendre en compte ou non le frottement. En ce sens, nous pourrions dire que la schématisation de l'enseignant s'accommode aux interventions des élèves et fonctionne non seulement comme une structure cognitive [451] assimilatrice, (elle fournit à l'enseignant les opérations logico-discursives lui permettant d'assimiler les réponses des élèves), mais elle se transforme également pour s'accommoder aux interventions des élèves. La double fonction assimilatrice et accommodante de la schématisation de l'enseignant dans cette situation d'interlocution [452] est notamment visible à la manière dont il module l'échange lors de la phase 5 de la séquence (voir transcription p. 416) : les interventions des élèves sont assimilées aux possibilités envisagées avant l'échange (elles sont catégorisées en réponses correctes et erronées) mais la schématisation de l'enseignant s'enrichit d'une nouvelle catégorie de réponses "correctes", qui prennent en compte le frottement et donnent la boule de pétanque première à toucher le sol. Par contre, les réponses ambiguës que nous avons discutées dans l'analyse de la situation de malentendu sont simplement ignorées. En outre, ni le rôle qu'a pu jouer la prise en compte du frottement au cours de la séquence dans les réponses non conformes (p.ex. celles donnant la boule de pétanque première en raison de sa $|\text{LOURDEUR}|$), ni celui de la constante g dans la situation de malentendu, ne donne lieu à une accommodation de la schématisation de l'enseignant en fin de séquence. Ainsi, même si la schématisation s'est accommodée aux réponses qui donnent la boule de pétanque première en considérant les forces de frottement, il est fort probable que cette accommodation ne quittance, du point de vue des élèves, que les réponses schématisant une double possibilité, avec et sans frottement. En effet, les élèves ayant fourni une réponse qui a été assimilée à une préconception par l'enseignant ne recevront probablement pas le discours de l'enseignant comme une *quittance* de leur *réplique*, d'une part parce que l'explication du point crucial de la résolution des équations est trop rapidement présentée par l'enseignant, et uniquement à l'oral, et d'autre part parce qu'ils se sont peut-être déjà sentis dans l'erreur à un moment où à un autre de la séquence. L'accommodation par l'enseignant de sa schématisation, sous cette forme, ne profite donc probablement qu'aux élèves les plus performants au début de la séquence, comme le laisse entendre le fait que Urs - qui a donné une réponse conforme au modèle lors du pré-questionnaire - est le seul élève à intervenir lors de la présentation orale du corrigé par l'enseignant (voir section 6.3.3.1, p. 416).

En examinant plus en détails les rapports entre processus de communication et construction des connaissances par les élèves ci-dessous, je tenterai de montrer que l'erreur, statut attribué à des répliques par l'enseignant et éventuellement reçu comme tel par les élèves concernés, se construit dans la conversation, notamment en définissant d'une manière spécifique et limitées le sujet de la conversation autour de l'item #1. Autrement dit, l'absence d'expertise des processus communicationnels de part et d'autre conduisent

450. L'enseignant donne la réponse en prenant en compte une force de frottement (la "résistance de l'air"), et accepte ainsi cette schématisation des élèves, et montre le détail arithmétique essentiel à la reconnaissance des réponses non conformes que j'ai mises en évidence ci-dessus (voir section 6.3.6.1, p. 449), quoique très succintement.

451. C'est l'analyse de la situation de malentendu dans son ensemble qui nous conduit à modéliser la schématisation, et tant que processus et produit logico-discursif, à une structure cognitive co-construite et présente dans l'interlocution.

452. Il est probablement indispensable à la pratique de l'enseignant de disposer de structures permettant de rapidement assimiler les réponses des élèves, sans quoi la tâche cognitive consistant à entretenir 23 conversations simultanément peut s'avérer épuisante voire impossible. Néanmoins, nous soulignons ici la dialectique assimilation - accommodation pour mettre en évidence une tension intéressante de la communication en milieu scolaire qui se situe à l'articulation du conversationnel et du cognitif.

l'enseignant et les élèves à attribuer un statut d'erreur à des réponses qui, sinon, auraient pu constituer une étape intermédiaire dans la construction de connaissances.

Conséquences de la complexité communicationnelle pour la question de la construction de connaissances par les élèves

Le modèle de la situation d'interlocution utilisé se révèle trop simple pour la complexité de la situation étudiée sur plusieurs aspects au moins, que je résume ci-dessous. Les interlocuteurs varient au cours de l'échange, ce qui permet à l'enseignant de déléguer la décision individuelle de *quittance* de leur *réplique* aux élèves eux-mêmes (en produisant un discours général adressé à la classe comme à un interlocuteur unique), voire d'exclure implicitement certains interlocuteurs de la conversation en *n'acceptant pas* leur *réplique* en tant que telles. La posture de l'enseignant varie également au cours du temps, et si une posture compréhensive permet de justifier à un moment donné de ne pas quittancer les répliques des élèves, cette justification perd sa validité à un autre moment, dès lors que l'enseignant change de posture (p.ex. quand il adopte une posture de diagnostic, évaluant les réponses de élèves pour décider qui, parmi eux, disposent de conceptions erronées). Enfin, pour encore complexifier le tableau, l'enseignant s'adapte en toute intelligence à ce processus de communication tel qu'il peut l'observer au cours de sa pratique, engagé qu'il est dans un échange une vingtaine d'élèves.

Or, si le modèle de la situation d'interlocution que j'ai utilisé en tant que chercheur se révèle trop simple, celui utilisé par l'enseignant pour évaluer les répliques des élèves lorsqu'ils les *quittance* (ou pas), l'est encore d'avantage, ce qui a des conséquences spécifiques sur la construction des connaissances par les élèves, que je tenterai de décrire ci-dessous en formulant l'hypothèse d'une *fabrication conversationnelle de l'erreur* attribuée aux élèves[453]. En effet, l'analyse de la situation de malentendu montre que des reprises partielles du discours de l'enseignant jouent un rôle dans la production par les élèves de réponses que l'approche centrée sur les préconceptions attribue à des conceptions individuelles erronées ou aux modes de raisonnement fautifs des élèves eux-mêmes. Cette recherche remet en question ce modèle d'attribution, soutenant plutôt l'hypothèse d'une construction des connaissances des élèves en physique qui, au moins pour une partie des élèves, prend le discours de l'enseignant comme fondement plutôt que les objets auxquels il fait référence. Ceci conduit, au moins dans un premier temps, à des reprises partielles du modèle enseigné à travers une schématisation moins bien différenciée donnant lieu à des malentendus. Il est important de souligner qu'il s'agit là d'un commentaire au sujet d'un processus, dont il convient de distinguer différentes étapes : une situation de malentendu peut permettre, dans certains conditions, à des élèves de construire les connaissances visées par l'enseignant plus tard. C'est le cas, dans cette situation, de Henriette et Rose à la phase 4 de la séquence, quand elles travaillent avec Thibault.

L'analyse de cette situation de malentendu et de son évolution au fil de la séquence montre que la seule élève pour qui nous observons une résolution de la situation de malentendu (Sylvie), est passée par

453. Cette hypothèse reprend simplement l'intuition ou sentiment naïf qu'ont ressenti de nombreux élèves, face à ce qu'ils auraient appelés dans leur langage du quotidien "une question piège". J'espère donc contribuer ici à l'analyse scientifique de ce problème bien connu, mais peu reconnu.

la schématisation d'une solution intégrant les deux alternatives : avec et sans frottement. Or, nous avons vu dans l'analyse des implicites à la situation d'interlocution (voir page 449) qu'au niveau strictement logique, c'est le fait de ne pas considérer le frottement dans la conversation qui rend erronée la réponse fréquente des élèves qui donne la boule de pétanque première à toucher le sol. Dès lors, l'absence de prise en compte des forces de frottement à la schématisation des savoirs enseignés [454] lors de la transposition des savoirs et de la conception de la séquence semble participer d'une fabrication conversationnelle [455] à de la prétendue "préconception des élèves" et laisse la voie libre à une confusion ou *indifférenciation* entre *force* et *accélération*, du fait que ces concepts ne se distinguent effectivement pas dans les actes de résolution du problème de l'item #1, si la seule *force* considérée est la *force gravitationnelle*, puisqu'il devient possible de passer directement d'une valeur à l'autre. C'est une excès de simplification du modèle, un excès de vulgarisation pour ainsi dire, qui rend possible la situation de malentendu analysée.

J'aurais voulu étayer cette hypothèse à l'aide d'une analyse des traces laissées par les élèves. Cela aurait permis de montrer que la prétendue "préconception" identifiée dans la littérature est la fabrication d'un contrat communicationnel - un contrat didactique - qui restreint trop le sujet de conversation ou, autrement dit, qui effectue une transposition des savoirs si simplifiée, si vulgarisée, que même le sens commun (avec toutes ses approximations et ses indifférenciations) n'y trouve plus sa place. Dès lors, les "connaissances" établies ne sont pas articulées aux conceptions et raisonnements individuels à partir du monde physique : elles ne sont, pour la plupart des élèves, que des bribes de discours dont les enjeux précis échappent à ces élèves. Mais, les moyens méthodologiques m'ont fait défaut pour établir ce qui n'est donné ici, somme toute, que comme une hypothèse en vue de futurs travaux de recherche. Le problème tient notamment à ce qu'il s'agirait de montrer les effets de *l'absence* de schématisation du frottement, autrement dit à s'intéresser à ce qui fait "tabou" dans la communication de cette classe. Or, comment peut-on établir scientifiquement avec des données naturelles que l'absence d'un objet de discours cause ceci ou cela ? La démarche classique pour établir de tels résultats consiste à comparer, mais à l'aide de données expérimentales, les effets *avec* et *sans* l'objet de discours. C'est particulièrement difficile à réaliser si l'on veut travailler sur des processus spontanés de construction de connaissances en contexte scolaire.

Des objets de discours aux outils sémiotiques plus ou moins partagés au sein d'une classe

Le langage de la logique naturelle nous a été utile pour formuler des hypothèses précises quant au sens des discours utilisés en classe selon les divers points de vue, et cela nous a permis d'aller au-delà des intuitions interprétatives initiales du chercheur. Cela a aussi permis de toucher des phénomènes supra-individuels, concernant la situation dans son ensemble et plusieurs élèves à la fois. Si nous nous intéressons

454. Je n'ai pas mené d'enquête sur les raisons de cette non-entrée en matière, mais que ce soit le refus d'un enseignant ou d'un autre, une décision émanant des curricula ou des moyens d'enseignement, le résultat psychologique discuté ici est le même pour les élèves. Dans la séquence étudiée, l'enseignant a le mérite de s'être confronté à ce problème en partant des réponses des élèves à un pré-questionnaire, dans une approche pédagogique qui laisse la possibilité aux élèves d'exprimer leurs opinions personnelles et d'accommoder sa schématisation en fin de séquence. Dans d'autres approches, je n'aurais peut-être même pas eu l'occasion de me rendre compte des enjeux du frottement pour un problème comme celui des deux balles.

455. En clin d'œil à la *fabrication sociale de la réalité* sociale (valeurs, statuts, etc.) qu'ont montré Berger et Luckmann (1966), j'utilise cette expression pour suggérer l'hypothèse d'une fabrication conversationnelle d'une réalité conversationnelle, à savoir la *véracité* des propos des élèves...

à un objet de discours, au sens où l'entend Grize, plutôt qu'aux représentations individuelles, celui-ci peut être abordé comme un outil sémiotique[456] dont il n'est pas exclu qu'il circule dans une classe à travers l'activité logico-discursive conjointe des interlocuteurs qui y participent. Autrement dit, les classes-objets sont des objets de discours qui peuvent être repris après avoir été entendus, et dont l'usage canonique se construit progressivement et collectivement[457]. De manière analogue aux objets concrets[458], ces objets de discours peuvent être saisis par les élèves, transmis au gré de la conversation, "passer de mains en mains" en fonctionnant comme des outils sémiotiques disponibles au collectif réuni en classe. C'est évidemment le cas lorsque la schématisation co-construite en classe est largement partagée par les participants, sans quoi la transmission des connaissances échouerait toujours. Par contre, il est moins banal de remarquer que cela peut également être le cas pour les réponses des élèves qui passent pour des erreurs, c'est-à-dire lorsque l'enseignement des concepts de physique ne réussit que *partiellement*. Lorsque les élèves manipulent un nouveau concept dans leurs activités conversationnelles mais ne se l'approprient que partiellement, ils font des usages différents de l'objet de discours que ceux de l'enseignant qui prennent l'apparence d'erreurs, alors qu'il s'agit de connaissances en construction. Autrement dit, au cours de l'acquisition d'un concept, les élèves sont susceptibles de faire usage d'un objet de discours linguistiquement semblable à celui de l'enseignant, mais sans se l'approprier d'emblée en tant qu'outil sémiotique : l'usage et le sens ne correspondent que partiellement au concept des savoirs enseignés.

Ce phénomène a déjà fait l'objet de résultats de recherches, par exemple Tiberghien (1997) le met en évidence sous l'appellation de *conception intermédiaire*[459]. Dans une approche individuelle et fonctionnaliste, la classe-objet partiellement divergente de l'enseignant peut effectivement *fonctionner* comme une conception intermédiaire qui permet, à terme, d'acquérir le concept du physicien (ou pas). Mais, s'il n'est pas interprété dans le sens relativement privé dans lequel le locuteur le fait *fonctionner*, l'objet de discours peut aussi être abordé dans une approche socio-cognitive comme un outil sémiotique, mis à disposition par la schématisation de l'enseignant ou des pairs, et dont l'appropriation partielle constitue dans notre recherche une situation de malentendu. Dès lors que l'objet logico-discursif[460] est utilisé dans des schématisations accessibles par les élèves, il est susceptible de circuler entre eux, voire de devenir un outil sémiotique commun à plusieurs apprenants. Ceux-ci le reprennent dans un sens et un usage plus ou moins semblable et partagé, du fait qu'il est construit dans une situation d'interlocution effectivement plus ou moins partagée.

456. Voir à ce sujet la partie théoriques présentant les fondements de notre approche, et en particulier les connaissances établies en psychologie culturelle concernant l'usage des concepts et des objets concrets en tant qu'*outil sémiotique*, que nous reprenons ici pour l'appliquer aux *objets de discours* tels qu'ils sont définis dans la théorie de Grize.

457. Chez les enfants en bas âge, ce phénomène est facile à observer : le plus souvent un nouvel objet de discours est assimilé par l'enfant dans des usages non conventionnel voire bizarre, avant d'être maîtrisé dans un langage conventionnel.

458. Je m"inspire en cela des travaux d'épistémologie génétique, qui ont montré comment des actions et opérations sur du matériel concret donnaient forme aux actes et opérations sur des objets symboliques par la suite au fil de l'ontogenèse.

459. Du fait de l'approche communicationnelle adoptée dans cette recherche, cet intermédiaire n'apparaît pas d'emblée comme une conception d'une élève, mais plutôt comme une pratique conversationnelle, une pratique de l'interaction sociale au fil de laquelle se construit, au sein même des activités de communication, un objet de discours que l'élève manipule plus ou moins à sa manière. Ces actions, manipulations et opérations logico-discursives ne construisent que très progressivement, au fil de l'activité, un *concept* ou une conception individuelle, encore que même dans ce cas l'élève a probablement besoin de ses outils langagiers et symboliques pour reconstruire son concept au moment même de la résolution d'un problème, même connu, à moins d'avoir acquis une grande expertise.

460. Nous nous référons à cet outil sémiotique en tant qu'opération ou objet de la schématisation, et non en tant que conception d'un élève, dans notre approche communicationnelle.

En s'intéressant à un objet de discours plutôt qu'à des réponses individuelles, nous explorons la dynamique de l'apprentissage des élèves en entrant *par les outils* et leur usage plutôt que *par les personnes* et leur histoire. Dès lors, nous pouvons aborder la classe-objet comme un objet d'analyse, laissant momentanément de côté l'approche individuelle. Cela permet une psychologie sociale de la construction des connaissances, qui prend appui sur les signes et leurs usages pour décrire et expliquer les processus d'apprentissage des individus sans se restreindre à leur fonctionnement individuel isolé. Car, s'il y a bien une pratique qui réunit les humains et leur permet de sortir (un peu) de leur isolement ontologique déterminé par la délimitation de leur corps biologique et l'intégrité de leur expérience psychique privée, c'est bien leur pratique et leurs usages des signes et symboles. La science de cette pratique et ce qu'elle permet de (dé)construire sur le plan psychologique reste encore largement inexplorée : ce serait la *sémiologie* que Grize souhaitait construire à l'intersection de la logique, de la psychologie, des sciences de la communication et du langage, pour donner à l'épistémologie génétique les moyens concrets d'investiguer la dimension sociale et symbolique de la connaissance, dont l'approche socio-cognitive n'a cessé de montrer l'importance pour le développement de l'intelligence et pour son exercice dans de multiples contextes, depuis ses tout premiers travaux (Perret-Clermont, 1976, 1979).

6.4 Situation #3 : *"- fallait appuyer ?"*

6.4.1 Résumé

Les élèves répondent à une série de questions lors du pré-questionnaire, questions conçues par l'enseignant pour une évaluation diagnostique des conceptions des élèves au début de la séquence. La seconde question (l'item #2[461]) invite les élèves à comparer l'indication affichée sur un pèse-personne sur lequel se trouve un personnage, dessiné dans quatre postures différentes. L'enseignant s'attend à trouver des réponses correctes et à des réponses erronées en raison de quelques difficultés connues. Sur l'ensemble des 23 élèves, 5 élèves produisent des réponses à cette tâche qui ne sont assimilables ni aux difficultés envisagées par l'enseignant, ni au modèle enseigné.

L'analyse de ces réponses me permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu impliquant plusieurs élèves. La divergence entre ces élèves et l'enseignant porte sur la manière dont le personnage représenté sur l'illustration appuie une canne au plafond : selon l'enseignant, le personnage exerce une force sur le plafond à travers la canne, alors que pour certains élèves il ne fait que le toucher sans pression, pour d'autres il retient un plafond à l'aide de la canne, et pour d'autres encore, il se suspend à une canne collée au plafond. Cette hypothèse permet de rétablir la cohérence de trois points de vue différents pour ces cinq élèves, portant tous sur un même élément de la consigne. L'analyse permet de montrer que cette situation de malentendu se construit - comme la situation précédente - du fait que les élèves ne procèdent pas à partir du même point de départ que l'enseignant dans leur cheminement de pensée : ils ancrent leur interprétation de la consigne dans les schémas illustratifs plutôt que dans le contenu discursif de la consigne. L'enseignant ne procède même pas à partir d'une lecture de la consigne (ni de l'illustration ni du discours) lorsqu'il donne la réponse à l'item#2 à la classe en fin de séquence, mais à partir de ses connaissances de physique, ce qui lui permet de contourner le problème que se posent ces élèves.

L'analyse de l'évolution de cette situation de malentendu au cours de la séquence met en évidence la disparition des divergences sans pouvoir pour autant établir, pour tous les élèves concernés, qu'ils changent individuellement de point de vue. En effet, vu que le travail sur les items du pré-questionnaire se poursuit en petits groupes, il est également possible que certains élèves renoncent simplement à faire valoir leur opinion au sein de leur groupe. Une enquête sur la conception de l'item #2 du pré-questionnaire par l'enseignant permet de brièvement montrer comment il adapte une tâche trouvée dans un ouvrage de didactique des sciences.

L'analyse de cette adaptation d'une tâche permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu en amont de celle analysée durant les activités en classe, au moment même de la conception de l'item #2 par l'enseignant. Cette situation invite, comme la précédente, à des investigations plus systématiques en sémiologie, qui permettraient de réinvestir indirectement les résultats de l'étude de situations de malentendu singulières dans une démarche orientée vers la pratique. Enfin, je saisis l'occasion des analyses

461. La consigne de l'item #2 est disponible en annexe (figure B.16, p. 818).

effectuées pour esquisser un développement de la logique naturelle qui introduirait une nouvelle opération logico-discursive dans l'ensemble défini par Grize (1996).

6.4.2 Présentation des incidents critiques

6.4.2.1 Présentation de la tâche

Pour cette situation [462], je vais examiner les réponses des élèves à la deuxième question du pré-questionnaire. Dans les sections suivantes, l'enquête est complétée de l'analyse de l'évolution de la situation de malentendu au fil de la séquence, et de la conception de la tâche par l'enseignant à partir d'un ouvrage de didactique des sciences.

La figure 6.18 présente la question telle que les élèves l'ont reçue dans le pré-questionnaire, pour une passation individuelle sur format papier, et à laquelle je me référerai par la suite sous l'appellation *item #2*.

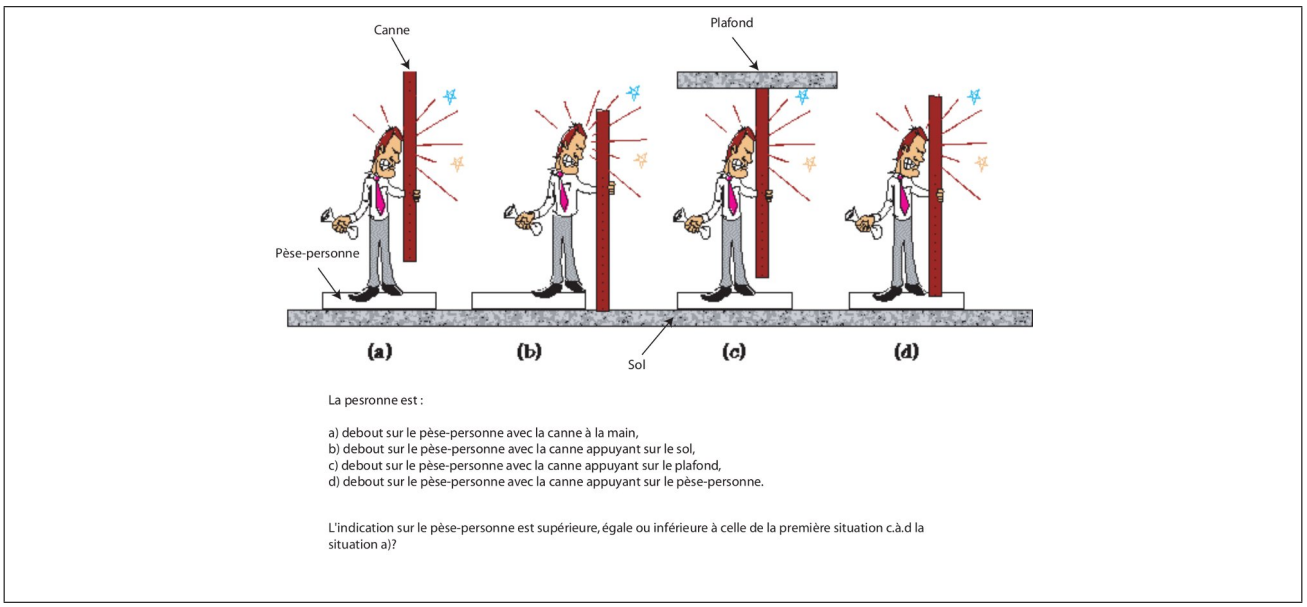


FIGURE 6.18 – Item 2 du questionnaire.

L'item #2 du pré-questionnaire a été conçu dans le cadre du travail de mémoire de l'enseignant, notamment dans le but d'effectuer une évaluation diagnostique des préconceptions des élèves avant la séquence d'enseignement (voir chapitre 4.4, p. 289 et suivantes). Étant donné ce but, je vais considérer qu'il y a *incident critique* lorsqu'une réponse d'élève à l'item #2 ne peut être assimilée ni à une préconception ni à une réponse correcte, autrement dit lorsqu'une ou plusieurs réponses d'élève ne sont pas assimilables à la schématisation de l'enseignant [463].

462. Le titre de cette situation est une référence à un sketch fameux par *Les Inconnus*, diffusé sur Antenne 2 de 1990 à 1992.
463. Lorsque c'est le cas, le point de vue de l'enseignant ne rend pas compte de ces réponses d'élèves et, partant, la fonction diagnostique de l'évaluation échoue, au moins partiellement. Je considère à ce moment-là qu'il y a un *incident critique* dans la communication entre enseignant et élèves. Le corollaire de ce *modus operandi* consiste à affirmer que si l'enseignant schématisait toutes les difficultés possibles, il n'y aurait pas d'*incident critique* à partir duquel je pourrais poser l'hypothèse d'une situation de malentendu. Cela me semble une opérationnalisation acceptable du concept d'*incident critique* puisque, en effet, il suffirait que l'enseignant intègre à sa schématisation les raisonnements des élèves produisant les réponses ambiguës

Avant de présenter les réponses des élèves et de discuter d'éventuels incidents critiques, je propose une première reconstruction du point de vue de l'enseignant à partir de sa schématisation des réponses correctes et de celles qui correspondent à la préconception, telles qu'il les anticipe.

6.4.2.2 Présentation des réponses escomptées

Du point de vue de l'enseignant, l'item #2 met en scène un personnage posé sur un pèse-personne, et tenant par la main une canne dans quatre postures différentes. La consigne précise que la personne, dans la première posture (a) est "debout sur le pèse-personne avec la canne à la main", dans la deuxième posture (b) elle est "debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le sol", dans la troisième posture (c) elle est "debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le plafond", et dans la quatrième posture (d) elle est "debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le pèse-personne". Les élèves sont invités à comparer les postures (b), (c) et (d) à la posture (a) quant à "l'indication" fournie par le pèse-personne.

L'objectif de cet item consiste à faire faire aux élèves une analyse des forces exercées sur le pèse-personne, pour chacune des quatre postures. Cette analyse requiert des élèves qu'ils délimitent le système des interactions entre les divers corps physiques mis en scène (personnage, canne, sol, plafond, etc.).

Voici un extrait du mémoire professionnel de l'enseignant où il exprime le raisonnement attendu de la part des élèves :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire pp. 17-18

> Dans cette situation, il très important de faire comprendre aux élèves que le choix du système à étudier est fonction de la question posée. Ici, le système ne s'impose pas de lui-même : est-il préférable de prendre l'homme, l'homme et sa canne, le pèse-personne seul, l'homme et le pèse-personne, etc? L'indication du pèse-personne est donnée par l'interaction entre l'homme et le pèse-personne. Elle doit dépendre des interactions avec la Terre mais aussi de celle du sol avec le bâton. La représentation des forces appliquées sur ce système permet de répondre à la question. On peut aussi remarquer qu'une force appartient à un objet : les grands objets exercent nécessairement une plus grande force que les petits, les plus grands sont apparemment toujours plus forts que les petits. Quelques élèves approuvent l'existence d'une force seulement s'il y a un contact entre les deux objets.

Dans cet extrait, l'enseignant ne précise pas les réponses escomptées dans le détail, mais explicite suffisamment le raisonnement attendu pour que nous puissions reconstruire son point de vue quant aux réponses conformes à son enseignement et aux difficultés escomptées.

analysées ci-dessous, pour qu'il soit en mesure de les repérer dans le dialogue avec les élèves et puissent les utiliser dans un dialogue en vue de la construction d'une schématisation partagée, dans un processus permettant progressivement le partage de la schématisation construite par l'enseignant avec ses élèves.

Premièrement, l'enseignant insiste sur "le choix du système à étudier". Nous n'en savons pas plus à partir de cet extrait, car l'enseignant ne donne pas d'indications précises sur les opérations à mettre en œuvre, ni sur la procédure de résolution du problème.

Deuxièmement, du point de vue de l'enseignant, les élèves devraient répondre en effectuant une analyse du système des forces exercées sur le pèse-personne pour les quatre postures. Pourquoi faut-il analyser l'équilibre des forces alors que "l'indication du pèse-personne" est affichée en $kilogrammes$? L'indication de la masse en $kilogrammes$ correspond à une grandeur calculée à partir du rapport entre la force mesurée à la surface du pèse-personne, d'une part, et de l'accélération des objets en chute libre à la surface de la Terre ("g"), d'autre part. Autrement dit, un pèse-personne fabriqué pour un usage terrestre utilisé sur la lune afficherait une indication en $kilogrammes$ erronée. Cet artifice du pèse-personne s'observe également lorsqu'une personne monte dessus : l'indication affichée monte bien au-delà de l'indication correspondant à la masse de la personne pendant quelques instants, avant de se stabiliser, preuve que la mesure effectuée est celle de la force exercée sur sa surface, c'est-à-dire le produit d'une masse et d'une accélération. Comme l'accélération du corps n'est pas nulle lorsque l'on monte sur le pèse-personne - et encore moins lorsque l'on saute dessus ! - l'indication en $kilogrammes$ bondit alors qu'à l'évidence la masse de notre corps n'a pas changée [464]. Si les élèves ont probablement vécu cette expérience, ils n'ont pas forcément compris sa signification en relation au modèle enseigné en classe de physique, et l'unité de mesure affichée par le pèse-personne constitue probablement un obstacle à la réussite de cet exercice.

Troisièmement, l'enseignant attire l'attention sur une éventuelle difficulté dans l'analyse relative à la transmission des forces entre les objets, en particulier lorsque ceux-ci ne sont pas directement en contact les uns avec les autres. C'est le cas par exemple pour la posture (c), où la force exercée par le plafond sur le pèse-personne est transmise *à travers* le personnage.

Ainsi, pour réussir cet exercice, les élèves devraient effectuer une analyse du système des interactions entre les divers objets et selon les postures, et comprendre "l'indication sur le pèse-personne" en tant que mesure de la force exercée sur la surface supérieure du pèse-personne, et non en tant que mesure de la masse de l'objet comme le laisserait entendre l'unité de mesure affichée, qui est en $kilogrammes$. En outre, les élèves devraient inclure dans leur système des forces exercées sur la surface du pèse-personne par des objets qui ne sont pas directement au contact avec cette surface, comme la canne portée par le personnage.

Les ressources dont les élèves dispose, de la part des pratiques en classe, sont notamment :

— l'analyse des diverses postures du personnage à l'aide d'un "dessin des forces" [465] ;

464. Les enfants, qui ont bien raison d'être intrigués par ce phénomène, adorent sauter sur les pèse-personnes...

465. Cette pratique scolaire habituelle dans la classe étudiée, qui consiste à dessiner sur une esquisse des flèches partant du centre d'un objet pour représenter des vecteurs, constitue une forme vulgarisée de la modélisation pratiquée en physique. J'y reviendrai plus en détail dans la discussion de la situation de malentendu #7, qui est consacrée à cette pratique d'une schématisation graphique plutôt que verbale, et qui donne lieu à de nombreuses divergences entre élèves, enseignants et manuels de physique. Vu la complexité d'une discussion d'une situation de malentendu impliquant plusieurs registres sémiotiques, je

— la loi des forces opposées (voir section 6.1.2, p. 381) présentée sur le polycopié du cours avec l'intitulé "troisième loi de Newton" (voir figure B.34, p. 864), qui est nécessaire à la comparaison des postures (c) et (d) dans cet exercice.

Ces deux éléments devraient permettre aux élèves de modéliser le système des interactions entre le pèse-personne, le personnage, la canne, le plafond et le sol, et de répondre aux trois questions comparant les postures (b), (c) et (d) à la posture (a). A partir de cette synthèse de la schématisation de l'enseignant, je considère donc qu'une réponse correcte à cet item exige des élèves :

— de comprendre que l'indication sur le pèse-personne correspond à la valeur de la force exercée sur sa surface supérieure ;

— de choisir comme système à étudier les forces exercées sur la surface supérieure du pèse-personne, ce qui inclut non seulement le poids du personnage mais aussi, selon les postures, le poids de la canne et la force de soutien du sol, étant donné qu'il y a transmission des forces à travers les objets solides.

En utilisant ces deux critères pour les quatre postures présentées dans la consigne de l'item #2, nous sommes à même de présenter les réponses escomptées par l'enseignant et conformes aux savoirs enseignés pour chaque posture :

— dans la posture (a), l'indication sur le pèse-personne correspond au produit des masses du personnage et de la canne et de la force de gravitation exercée par la Terre, c'est-à-dire que le pèse-personne mesure le poids du personnage et de la canne ;

— dans la posture (b), l'indication sur le pèse-personne est moindre par rapport à la posture (a), d'une part parce que le pèse-personne ne mesure que le poids du personnage, et d'autre part parce que le personnage se repose éventuellement sur la canne, et dans ce cas une force de soutien exercée par le sol par l'intermédiaire de la canne s'oppose à la force exercée par le personnage sur le pèse-personne ;

— dans la posture (c), l'indication sur le pèse-personne est plus importante que dans la posture (a), car elle correspond au produit des masses du personnage et de la canne et de la force de gravitation exercée par la Terre, auquel s'ajoute la force exercée par le plafond sur la canne, qui est la force de réaction d'intensité identique et de sens opposé à la force exercée par le personnage sur le plafond par l'entremise de la canne ;

— dans la posture (d), l'indication sur le pèse-personne est égale à celle de la posture (a), et correspond au produit des masses du personnage et de la canne et de la force de gravitation exercée par la Terre, que le personnage s'appuie ou non sur la canne ; en effet, que celle-ci repose sur le pèse-personne ou non ne change pas la force exercée sur la surface supérieure du pèse-personne (la canne ne dispose pas d'un point d'appui extérieur au système d'interaction à la surface du pèse-personne).

me contente pour cette situation de malentendu #3, de prendre en compte le registre verbal, qui est par ailleurs suffisant à mettre en évidence et décrire une situation de malentendu pour plusieurs élèves.

Exprimée de manière synthétique à la manière de certains élèves, la réponse conforme à l'item #2 s'énoncerait :

- (b) $<$ (a) ;
- (c) $>$ (a) ;
- (d) $=$ (a).

Examinons à présent la schématisation d'une réponse non conforme aux savoirs enseignés à cet item, toujours du point de vue de l'enseignant. L'enseignant ne définit pas très explicitement une préconception pour cet item, comme c'est le cas pour l'item #1, mais anticipe néanmoins une difficulté en particulier : il s'attend à ce que certains élèves refusent - ou oublient - de considérer la transmission de forces de manière à inclure dans leur analyse le poids de la canne sur le pèse-personne (a), la force de soutien du sol (b), la force exercée par le plafond sur le pèse-personne (c).

Cette difficulté justifierait les réponses suivantes :

— dans la posture (a), l'indication sur le pèse-personne serait considérée comme le produit de la masse du personnage avec la force de gravitation exercée par la Terre, sans prendre en considération la masse de la canne, c'est-à-dire que le pèse-personne mesurerait le poids du personnage uniquement ;

— dans la posture (b), l'indication sur le pèse-personne serait considérée identique à la posture (a), parce que le pèse-personne ne mesurerait que le poids du personnage, la force de soutien exercée par le sol par l'intermédiaire de la canne étant ignorée ;

— Dans la posture (c), l'indication sur le pèse-personne serait considérée identique à la posture (a), la force de réaction exercée par le plafond sur la canne étant ignorée ;

— Dans la posture (d), l'indication sur le pèse-personne serait considérée comme supérieure à la posture (a), car le contact entre la canne et le pèse-personne ferait prendre en compte la force exercée par la canne sur le pèse-personne, c'est-à-dire que l'indication sur le pèse-personne serait considérée comme le produit des masses du personnage et de la canne et de la force de gravitation exercée par la Terre.

Exprimée de manière synthétique à la manière de certains élèves, la difficulté escomptée à l'item #2 s'énoncerait :

- (b) $=$ (a)
- (c) $=$ (a)
- (d) $>$ (a)

Je considérerai les réponses des élèves qui correspondent spécifiquement à la configuration ci-dessus comme des réponses escomptées par l'enseignant, correspondant à la préconception qu'il schématise. Les autres réponses, que je ne peux assimiler ni à ces erreurs escomptées par l'enseignant, ni aux réponses

conformes aux savoirs enseignés, feront l'objet d'une analyse pour examiner l'hypothèse d'une situation de malentendu.

Il est important de noter que selon cette "préconception", la réponse (d) donne une estimation conforme des forces exercées sur le pèse-personne (les poids de la canne et du personnage), mais avec un argument non conforme (le contact de la canne avec la surface supérieure du pèse-personne), qui s'identifie soit par une justification explicite de la part des élèves, soit en examinant la réponse à la posture (a) - si elle est disponible.

6.4.2.3 Présentation des traces

Le corpus de traces ne contient pas d'évaluation individuelle des réponses des élèves par l'enseignant, car cette évaluation n'a pas eu lieu. Comme pour l'item #1, cela s'explique par une décision d'ordre pédagogique : la passation du pré-questionnaire a été conçue par l'enseignant comme une évaluation diagnostique des conceptions des élèves. Il propose ce questionnaire aux élèves comme une première réflexion sur des situations-problèmes, dont il annonce qu'elles seront reprises tout au long de la séquence d'enseignement, dans le but de leur laisser la possibilité de discuter entre eux de leurs réponses et de faire évoluer leurs connaissances par leurs activités propres. Il dit également aux élèves qu'ils auront la possibilité de vérifier leurs réponses lors des activités expérimentales en fin de séquence. Dès lors, les premières réponses des élèves lors de la passation en individuel et sur format papier du pré-questionnaire ne sont délibérément pas commentées par l'enseignant.

L'enseignant fait travailler les élèves sur l'item #2 à divers moments lors de la séquence, qui sont les mêmes que pour l'item #1 (voir la liste, p. 409).

Je propose de ranger les productions des élèves en trois catégories avant d'entrer dans la reconstruction détaillée de points de vue spécifiques :

(I) Cette catégorie regroupe les réponses non conformes au modèle enseigné, qui correspondent à la difficulté escomptée par l'enseignant.

(II) Cette catégorie regroupe les réponses conformes au modèle enseigné, qui correspondent à la réponse correcte escomptée par l'enseignant.

(III) Cette catégorie regroupe les réponses ambiguës, qui ne correspondent ni à la difficulté, ni à la réponse conforme escomptée par l'enseignant.

Parmi les réponses des élèves, il n'y en a aucune qui corresponde spécifiquement à la configuration de la préconception anticipée par l'enseignant pour toutes les postures. De plus, certaines réponses d'élèves comprennent une analyse des forces exercées sur le pèse-personne pour la posture (a), alors que d'autres ne contiennent aucune indication concernant la posture (a), ce qui rend difficile l'identification des difficultés

escomptées uniquement à partir des comparaisons entre les postures, la posture (a) fonctionnant comme posture de référence.

Néanmoins, certaines réponses d'élèves correspondent à la difficulté escomptée pour une au deux postures. Je les rangerai tout-de-même dans la première catégorie de réponse, en attendant que le résultat de l'enquête quant au cheminement des élèves permette de décider si elles correspondent au nom à la difficulté anticipée par l'enseignant. Compte tenu de cet ajustement, les 23 réponses des élèves se répartissent comme suit :

— 4 élèves produisent une réponse non conforme pour une ou deux postures du personnage ;

— 14 élèves produisent une réponse conforme pour toutes les postures du personnage ;

— 5 élèves produisent une réponse ambiguë.

Examinons à présent chaque réponse individuelle des élèves à l'item #2 du pré-questionnaire lors de la passation individuelle, en commençant par celles de la première catégorie.

Les réponses non conformes

Une première catégorie regroupe quatre réponse (4 sur 23), que j'assimile partiellement à la schématisation de l'enseignant de la difficulté escomptée, c'est-à-dire au raisonnement décrit par l'enseignant comme l'absence de transmission de forces entre des corps qui ne sont pas directement en contact. Comme ces réponses ne correspondent que partiellement à la réponse escomptée ci-dessus, je distingue trois sous-catégories pour les réponses non conformes :

1. Les réponses non conformes au modèle enseigné.
   1.1. Les réponses qui correspondent à la difficulté escomptée par l'enseignant pour les trois comparaisons demandées.
   1.2. Les réponses qui correspondent à la difficulté escomptée par l'enseignant pour deux des comparaisons demandées.
   1.3. Les réponses qui correspondent à la difficulté escomptée par l'enseignant pour une seule des comparaisons demandées.

Aucune réponse ne correspond à la difficulté escomptée pour les trois postures (cas 1.1), mais quatre réponses fournissent des indices de cette difficulté : pour un élève à l'occasion des postures (c) et (d) (cas 1.2), et pour trois élèves à l'occasion de la posture (d) uniquement (cas 1.3).

La réponse de Yves correspond au cas 1.2. Voici, sa réponse :

Réponse majoritairement non conforme au pré-questionnaire - item #2

```
1 Yves:
2     b) inférieur, car une partie de la force "s'appuie" sur le sol
```

```
    c) en appuyant au plafond, les forces s'annulent
    d) l'homme en appuyant sa canne sur le pèse-personne créer de la force en plus sur
    l'engin
```

La réponse de Yves pour (b) est conforme au modèle, par contre en (c) et en (d) il procède à une analyse du système des interactions isolément, sans considérer qu'il y a transmission des forces à travers les objets solides. C'est la principale difficulté à laquelle s'attendait l'enseignant. Si l'analyse des forces exercées entre la canne et le plafond en (c) ressemble à une référence conforme au principe d'action et de réaction, aucune conséquence n'est tirée par l'élève dans sa schématisation quant à l'indication sur le pèse-personne, comme si les forces exercées par la canne sur le plafond et réciproquement n'avait pas d'effet sur le pèse-personne. En (d), l'absence de transmission des forces est encore plus explicite, puisque la réponse considère que la force appliquée par le personnage sur la canne modifie l'indication sur le pèse-personne, sans étendre l'analyse à la force de réaction qui soutient le personnage par l'entremise de la canne et, partant, diminue la force exercée sur le pèse-personne.

Je considère donc qu'il n'y a globalement pas d'incident critique dans la communication entre Yves et l'enseignant (*via* la consigne), puisque l'inadéquation de sa réponse au modèle enseigné correspond précisément à la difficulté anticipée par l'enseignant et que l'item #2 a pour fonction d'expliciter, de son point de vue.

Trois élèves produisent une réponse correspondant au cas 1.3. Il s'agit des réponses de Alain, Ernest et Ferdinand :

Réponses minoritairement non conformes au pré-questionnaire - item #2

```
Alain:
    a) égale c'est la situation de référence
    b) inférieur, la canne n'exerce pas de force sur le pèse-personne
    c) supérieur, une force compense l'effort pour pousser le plafond
    d) supérieur, la canne exerce sa force p sur le pèse-personne
Ernest:
    b) inférieure car la canne n'est pas comptée
    c) supérieure car il appuie donc: indication=Pcanne+Phomme+force de l'homme
    d) supérieure car il appuie, donc: même chose que ci-dessus
Ferdinand:
    b est < que a parce que la canne n'est pas sur la balance
    c est > que a parce qu'il y a plus de pression sur la balance
    d est > que a, c'est comme c, il y a plus de pression
```

Aux postures (b) et (c), Alain, Ernest et Ferdinand produisent des réponses assimilables à la réponse correcte attendue. Par contre, pour la posture (d) ces élèves considèrent que l'indication du pèse-personne est supérieure à celle de la posture (a), comme Yves (voir ci-dessus). La justification est la même que celle de Yves : ces élèves considèrent que c'est l'effort du personnage qui appuie sur la canne qui conduit à une augmentation de l'indication du pèse-personne dans la posture (d).

Ces élèves ont probablement manqué d'inclure dans l'analyse du système la force de réaction exercée par la canne sur le personnage, qui est de même intensité et de sens opposé à la force exercée par le personnage sur la canne, et qu'il faut soustraire au poids du personnage exercé sur la surface du pèse-personne pour obtenir l'indication du pèse-personne. Il s'agit ici aussi de la difficulté anticipée par l'enseignant, puisque dans la schématisation des élèves la force exercée par le pèse-personne sur la canne n'est pas transmise à travers le personnage au pèse-personne.

Dans ce cas, il ne s'agit pas d'un incident critique : il y a simplement absence de mise en œuvre des connaissances opératoires faisant spécifiquement l'objet du modèle enseigné. Il ne s'agit pas d'un incident de la communication, que nous pourrions décrire comme une reprise partielle de la schématisation de l'enseignant. Autrement dit, cette réponse fournit plutôt l'indice d'un raisonnement qui ne fait pas usage de la schématisation de l'enseignant. Je fais donc l'hypothèse qu'il s'agit ici plutôt d'une réponse intuitive des élèves, qui nous informe quant à la manière dont ces élèves raisonne spontanément pour répondre à la question posée.

L'observation détaillée du cheminement des réponses correspondant pour une ou deux postures seulement à la configuration énoncée permet de défendre l'hypothèse que ces élèves rencontrent effectivement la difficulté anticipée par l'enseignant, mais pour une ou deux postures seulement. Cette observation soulève une question : faut-il pour autant attribuer les schématisations de ces élèves à une *préconception* du moment que tous parviennent à fournir une réponse correcte pour la posture (b), par exemple ? Une *préconception* ne devrait-elle pas fournir une référence commune au cheminement des élèves pour *toutes* les postures du personnage dans cet item ?

En examinant plus en détail le rapport entre les réponses des élèves et les exigences des comparaisons demandées, nous pouvons constater que si Yves ne parvient pas à tirer les conclusions de la loi des forces opposées pour les situations (c) et (d), il n'en a simplement pas besoin pour analyser les forces exercées sur le pèse-personne en (a) et en (b). Alain, Ernest et Ferdinand, par contre, parviennent à utiliser cette loi pour raisonner correctement sur la posture (c), mais pas pour la posture (d). La posture (d) présente un défi supplémentaire : la force de réaction n'est pas exercée par un objet extérieur au système [personnage et canne], comme le plafond en (c), mais elle est exercée directement [par la canne] [sur le personnage]. Si les élèves ont considéré le personnage et la canne comme un ensemble solidaire, il leur faut faire une analyse des forces exercées à l'interne de cet ensemble pour tirer les conséquences de la loi des forces opposées sur le personnage, à savoir que son poids est réduit proportionnellement à son appui sur la canne. C'est précisément lorsqu'il n'y a pas de *situation de malentendu* que ces affinements progressifs dans la maîtrise des outils intellectuels peuvent être observés : plutôt que de montrer une incohérence, les réponses partiellement non conformes de ces élèves indiquent des connaissances en cours d'acquisition, permettant déjà de réussir pour les postures les plus faciles, mais pas encore pour la ou les postures les plus difficiles. Cette interprétation ne se justifie cependant que dans la mesure où, comme c'est le cas ici, nous pouvons faire référence à des exigences supplémentaires spécifiques pour justifier les différences de performances du même élève à plusieurs cas de figure - les positions du personnage - alors que le raisonnement de l'élève devrait faire référence aux mêmes concepts ou *préconcetions*.

Les réponses conformes

Une deuxième catégorie regroupe une majorité de réponses (14 sur 23), que j'assimile à la schématisation de l'enseignant de la réponse conforme aux savoirs enseignés. Elles donnent comme résultat de la comparaison de l'indication affichée par le pèse-personne :

- (b) $<$ (a)
- (c) $>$ (a)
- (d) $=$ (a)

Voici les réponses écrites à l'item #2 que j'ai rangées dans cette deuxième catégorie :

Réponses conforme au modèle enseigné au pré-questionnaire - item #2

```
Cassandra:
     b est inférieur à a: parce qu'il pousse la canne en bas et ça le rend moins lourd
     c est supérieur à a: parce qu'il pousse la canne contre le plafond et ça le pousse
     contre le bas
     d est égale à a: parce que la canne est avec la personne sur le pèse-personne comme
     pour a
Daniel:
     a)>b): l'indication sur le pèse-personne de l'image a) sera supérieure à celle
     de l'image b) car dans l'image b) la canne n'intervient pas sur le pèse-personne,
     au contraire le pèse-personne indiquera quelque chose d'inférieur par rapport au
    poide de l'homme, car il s'appuie sur la canne, et exerce donc pas toute la
     pression qu'il exerçait en temps normal
     b)<c): l'indication sur le pèse-personne de l'image c) sera supérieur à celle de
     l'image b) car dans c) il se sert de la canne pour exercer une forte pression sur
     le pèse-personne
     c)=d): les indications de c) et de d) sont égales, car les forces exercées sur le
     pèse-personne sont plus ou moins égales
Etienne:
     a)>b) parce que la canne touche le sol donc ne pèse pas sur le pèse-personne
     a)<c) il rajoute une force en pressant la canne sur le plafond
     a)=d) les poids des cannes se retrouvent dans tous les cas sur le pèse-personne
Henriette :
     b) plus léger que pour a) parce que l'homme s'appuie sur la canne. Il
     transfère une partie de son poids sur la canne qui touche le sol.
     c) plus lourd que a). L'homme appuie sur le plafond avec la canne ce qui fait qu'il
     s'enfonce sur le pèse-personne
     d) =. bien qu'il s'appuie sur la canne, le poids qu'il transfère dessus reste sur
     le pèse-personne.
Ilona:
     (b) inférieure parce qu'il répartit son poids sur le pèse-personne et sur la canne
     (c) supérieure parce qu'il augmente le poids qui le pousse vers le bas
     (d) égale parce qu'il ne change pas son poids.
Julianne:
     b) inférieur, la canne n'appuie pas sur le pèse-personne
```

```
     c) supérieur, il pousse sur le plafond donc ça le rend plus lourd
     d) égal, qu'il pose ou qu'il lève la canne elle pèse la même chose
Laurie:
     b<a: le poids de la canne est sur le sol et pas sur le pèse poids
     c>a: il exercce une pression sur le plafond ce qui lui fait exercer aussi une
     pression sur le pèse-personne
     d=a: le pèse-personne va peser la personne et la canne comme à la situation a
Marie:
     b) a>b -> il s'appuie sur la canne, donc le poids de la canne ne s'appuie pas sur
     le pèse-personne
     c) a<c -> appuyer sur le plafond l'enfonce dans le pèse-personne
     d) a=b -> le poids reste sur le pèse -personne
Ophélie:
     b) inférieure, car il s'appuye sur la canne, il enlève donc du poids
     c) supérieure, car il rajoute du poids en s'appuyant sur le plafond
     d) égale, car elle est identique à la situation (a) Cela ne change rien, que la
     personne soit sur le pèse-personne avec la canne à la main ou qu'il s'appuie avec
     la canne sur le pèse-personne.
Rose:
     b) inférieur, il met de son sur le sol
     c) supérieur, il appuye sur le plafond avec la canne, ce qui l'enfonce sur le
     pèse-personne
     d) égal, le poids qu'il met sur la canne reste sur le pèse-personne
Thibault:
     A>B B=A-la canne
     A<C C=A+force exercée sur le plafond
     A=D D=A (dans les deux cas l'homme et la canne sont sur la balance)
Urs:
     b) inférieur car le poids de la canne et le poids que le type enlève en s'appuyant
     sur la canne sont sur le sol et non le pèse personne
     c) supérieur car la force musculaire exercée par le type se répartit aussi sur le
     pèse personne
     d) égal car le poids se transfert du type à la canne mais reste sur le pèse
     personne
Victor:
     pour a, il y a le poids du gars et le poids de la canne
     a>b: pour b, le poids est partagé avec le sol, la barre étant appuyée au sol
     a<c: pour c, c'est plus lourd car une partie du plafond en qqsort est aussi sur la
     machine
     a=d: pour d c'est comme pour a
Xavier:
     a) a=a
     b) le poids sera égal au poids de l'homme, la canne sera un appuie. (b<a)
     c) une force sera créée (pression/impulsion), donc g+f. Le poids de l'homme
     augmentera. (c>a)
     d) le poids de l'homme sera plus grand. (d=a)
```

Remarque de transcription : *La réponse de Xavier est accompagnée d'un dessin pour la posture (c), que je n'ai pas reproduit car le discours de sa réponse est suffisamment explicite, et concordant avec le dessin.*

Ces réponses fournissent des justifications plus ou moins convaincantes, mais elles sont toutes assimilables à des réponses correctes au sens où elles construisent une schématisation de la transmission des forces ("... il pousse sur le plafond ça le rend plus lourd", "...ce qui l'enfonce sur le pèse-personne", "... la force musculaire exercée par le type se répartit aussi sur le pèse-personne", etc.) qui constitue l'objectif principal d'apprentissage de cette situation, selon la schématisation de l'enseignant dans son mémoire professionnel.

Les réponses ambiguës

Dans la troisième catégorie de réponses, il reste cinq réponses (5 sur 23) à examiner. Ces réponses nécessitent une reconstruction plus fine des points de vue et une analyse permettant éventuellement de décrire une situation de malentendu.

Voici ces réponses ambiguës dans leur intégralité :

Réponses ambiguës au pré-questionnaire - item #2

```
Annette:
     Dans la situation b), l'indication sur le pèse-personne est inférieure à celle
     de la situation a), parce que l'homme ne soulève pas la canne qui ne repose pas non
     plus sur le pèse-personne.
     Situation c): L'indication est la même que pour la situation a) le poids reste le
     même.
     Situation d): L'indication est plus lourde que dans la situation a) car le poids de
     la canne repose complétement sur le pèse-personne.
Barbara:
     b est <a car la canne n'est pas soulevée par le monsieur.
     C est < a car le plafond enlève une partie du poids (car on la colle au plafond)
     d est > a car toute la force de la canne est mise sur le pèse-personne alors que au
     a une partie de la force n'est pas là.
Germaine:
     b) inférieure (poids déchargé sur le sol par la canne)
     c) supérieure (poid en plus, partie du plafond qui appui en plus par la canne)
     d) égale
Pierrette:
     b) inférieure -> il transmet son poids sur la canne
     c) inférieure -> idem que b
     d) égale -> le poids est aussi sur la balance
Sylvie:
     a. pcq même situation
     b. il n'y as plus que le poid de l'homme car la canne est posé sur le sol
     c. le poid est le même, même si la canne touche le plafond
     d. l'homme appuie sur le pèse pers. Ce qui augmente le poid
     pour le c: si l'homme appuie fortement contre le plafond le poid sera supérieur
```

La réponse de Germaine est atypique : elle fournit les réponses conformes au modèle enseigné pour chacune des trois postures, mais avec une justification entre parenthèses pour la posture (c) qui interpelle : elle considère qu'il y a une "partie du plafond qui appui en plus par la canne". Cette justification relève peut-être d'un *incident critique*, malgré la réponse qui correspond au modèle enseigné, mais c'est peut-être aussi une énonciation de la loi des forces opposées. Quoiqu'il en soit, j'ai inclus cette réponse dans les réponses ambiguës car elle nécessite aussi une reconstruction plus détaillée.

Les réponses concernant la posture (b) sont toutes conformes au modèle enseigné, même si les justifications sont plus ou moins explicites. Les réponses quant à la posture (c), par contre, contiennent des schématisations diverses.

Annette et Sylvie considèrent l'indication sur le pèse-personne en (c) égale à celle de la posture (a) : il s'agit d'un premier *incident critique* pour lequel une reconstruction plus détaillée du point de vue des élèves semble nécessaire. Les réponses de Barbara et Pierrette pour la posture (c) donnent l'indication sur le pèse-personne inférieure à la posture (a). Barbara interprète que le personnage "colle au plafond" la canne. Il s'agit d'un autre *incident critique*.

Pierrette fournit une réponse conforme au modèle pour la posture (d). Annette, Barbara et Sylvie, par contre, fournissent une réponse pour la posture (d) qui correspond au moins en partie à la difficulté anticipée par l'enseignant, puisque dans sa comparaison entre la posture (a) et la posture (d), ces élèves considèrent que la canne exerce un force plus grande lorsqu'elle repose sur le pèse-personne. Dans la formulation des justifications de ces réponses, Annette et Barbara semblent plutôt proches de la schématisation non conforme pour la posture (a) - le personnage ne transmet pas le poids de la canne qu'il retient - que pour la posture (d). La schématisation de Sylvie, par contre, diffère de celle de l'enseignant plutôt au sujet de la posture (d), considérant que le personnage ne transmet pas la force de réaction exercée par le pèse-personne sur la canne lorsqu'il appuie dessus. Dans les deux cas, la réponse est justifiée par une schématisation qui n'effectue pas la transmission des forces entre les objets qui ne sont pas directement en contact, ce qui correspond à la difficulté anticipée par l'enseignant.

Synthèse

En résumé, voici les schématisations des élèves à reconstruire de manière détaillée dans la section suivante :

— La schématisation du point de vue de Germaine quant à la posture (c), qui justifie sa réponse en faisant reposer le plafond sur la canne ;

— La ou les schématisations du point de vue de Annette et de Sylvie quant à la posture (c), dont elles considèrent l'indication du pèse-personne identique à celle de la posture (a) ;

— La ou les schématisations du point de vue de Barbara et Pierrette quant à la posture (c), dont elles considèrent l'indication du pèse-personne inférieure à celle de la posture (a).

6.4.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue

6.4.3.1 Schématisation de l'enseignant

L'item #2 est schématisé par l'enseignant lors de la phase 5 de la séquence, à l'occasion de son discours conclusif sur cet item, dont voici la transcription complète :

Transcription 2. Phase 5 - Correction de l'item #2 - Demi-classe B - 27 février - 04' à 10'

Enregistrements vidéo

```
1
2  E:        alors pour le deuxième (.) la deuxième situation (...) alors pour la deuxième
3            (.) situation qu'est-ce qu'on a? (.) donc on aura (...) on aura dans le premier
4            cas si on prend le poids (.) bien sûr de (.) de l'homme (.)
5  ((l'enseignant commence à écrire au tableau, voir figure ci-dessous))
6            plus le poids de (.) de ce support (.) donc p1 et p2 (.) j'ai déjà expliqué ça
7            pendant (.) heu l'expérience (.) dans le premier cas (.) on les compte les deux
8  ((entoure les vecteurs p1 et p2))
9            (.) ça veut dire dans le premier cas j'ai p1 (.) plus p2 (.)
10 ((écrit "P1+P2"))
11           donc ça à peu près (.) si on prend seulement la masse ça fait à peu près septante
12 ((écrit "73kg"))
13           (.) trois kilogrammes (.) dans le premier cas (.) on doit multiplier bien sûr par
14           (.) pour retrouver p par (.) neuf virgule quatre-vingt un dans le deuxième cas
15           qu'est-ce qu'il se passe?
16
17 un élève: il faut soustraire la force que (.) le perso exerce sur la barre?
18
19 E:        alors on va négliger (.) on va enlever cette force (.)
20 ((l'enseignant entoure le vecteur p2 au tableau))
21           pourquoi? (.) parce que cette force n'est plus (.) appuyée sur le pèse-personne
22           mais sur (.) il y a un contact sur (.) la terre donc on va négliger celle-ci
23 ((désigne l'écriture "p2"))
24           ça veut dire on aura (.) le pèse-personne ici (.)
25 ((désigne la posture b))
26           ce qui est en p ici
27 ((désigne la posture b))
28           ce sera plus petit que la première situation (.) dans le troisième cas ((en c))
29           on va s'appuyer sur (.) donc une autre force [qui apparaît
30
31 un élève :                                    mais] dans le cas b on s'appuie? ou pas?
32
33 E:        alors juste (.) même si on on s'appuie (.) on aura toujours un poids plus petit
34           que (.) la première situation (.) même si on s'appuie (.) parce que on a négligé
35           déjà si on s'appuie p devient?
36
37 un élève: plus petit encore
38
39 E:        plus petit encore (.) p1 est plus petit (.) pour le troisième cas on va s'appuyer
```

```
40          sur le plafond (.) donc on a (.) le support applique une force sur le plafond et
41          bien sûr le plafond applique une autre force le principe d'action et de réaction
42          on va ajouter encore on a la première force on va ajouter encore une autre force
43          (.) qui est plus grand que (.) et en plus (.) donc (.) p1 p2 plus une autre force
44          (.) une troisième force (.) ça veut dire (.) que la partie c (.) le pèse-personne
45           aura (.) bien sûr (.) sera une valeur qui sera un peu plus grand que (.) a (.)
46          dans le dernier cas (.) dans le dernier cas si vous voyez bien on a (.) p1 et p2
47          (.) donc ce cas-là
48  ((désigne la posture d))
49          est le même (.) que le cas (.) a (...) c'est un résumé (.) de ces (.) ces quatre
50          situations (.) est-ce que vous avez des questions?
51
52  ((aucune question n'est posée par les élèves))
```

Le discours de l'enseignant s'accompagne du tracé, au tableau noir[466], d'un dessin des forces exécuté lors de la discussion de la position de référence (a) et reproduit ci-dessous par la figure 6.19. L'enseignant n'écrit rien d'autre au tableau noir, mais projette également la consigne (voir figure 6.18, p. 484) sur l'écran pendant toute son explication, ce qui lui permet de désigner de la main les diverses postures.

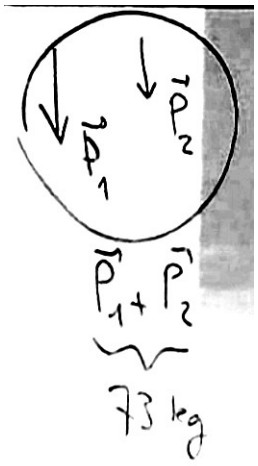


FIGURE 6.19 – Les traces inscrites au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de la posture (a) de l'item #2 à la phase 5 de la séquence.

Du point de vue de l'enseignant, il s'agit d'examiner les forces qui s'exercent sur le pèse-personne pour chacune des quatre postures. Pour cela, l'enseignant examine les appuis, en particulier de la canne, et ajoute au poids du personnage ($\overrightarrow{P_1}$) une force ($\overrightarrow{P_2}$) pour le poids de la canne à la posture (a). Si l'enseignant utilise des valeurs numériques pour donner une estimation réaliste dans le cas de la posture (a), avec un personnage de 70 $kilogrammes$ et une canne de 3 $kilogrammes$, il ne juge pas nécessaire d'utiliser des valeurs numériques par la suite, lors de ses explications pour les autres postures.

466. Les teintes noire et blanche ont été inversées pour faciliter la lecture.

Cette description du point de vue de l'enseignant est brève, mais elle suffit à cette étape de l'analyse, car elle permet de mettre en évidence les spécificités des cheminements des élèves qui rencontrent une difficulté avec l'une ou l'autre des postures de l'item #2.

6.4.3.2 Schématisations des élèves : leurs cheminements

Introduction

L'extrait de dialogue présenté pour la reconstruction du point de vue de l'enseignant (voir la section précédente, ci-dessus) contient également un dialogue avec au moins un élève, qui fournit des traces utiles à la reconstruction de schématisation(s) du point de vue des élèves, car ce dialogue explicite des questions auxquelles l'enseignant ne s'attendait pas. Du point de vue de l'enseignant, il suffit pour répondre à la question d'estimer si la force P, qui représente le poids exercé sur le pèse-personne, devient plus grande ou plus petite dans d'autres postures comparativement à la posture (a). En ce sens, on peut dire que la schématisation de l'enseignant repose sur l'énonciation des appuis, qui est rédigée sous la représentation illustrée dans la consigne de l'item #2 (voir figure 6.18, p. 484), et sur la décision d'ajouter ou de soustraire une intensité à la force exercée sur le pèse-personne comparativement à la posture (a). La schématisation de l'enseignant suit un processus de modélisation centré sur les appuis énoncés, une sorte de "raisonnement minimal" pour répondre aux questions posées.

Du point de vue des élèves, ce dialogue fournit deux indices de ce qui pourrait peut-être nous aider à reconstruire le cheminement des élèves produisant les réponses ambiguës relevées à la section précédente. Premièrement, le fait qu'un élève adresse à l'enseignant la question "mais dans le cas b on s'appuie ? ou pas ?" constitue un indice que cet élève construit sa schématisation plutôt à partir de l'illustration donnée en consigne que du discours de la consigne, puisque ce discours précise explicitement les appuis (voir figure 6.18, p. 484). Deuxièmement, la divergence entre la schématisation de l'enseignant et celles des élèves semble se porter plus précisément sur le type d'interaction que la canne entretient avec le personnage, d'une part, et - selon les postures - avec le pèse-personne, le sol ou le plafond, d'autre part. Cette interaction est justement difficile à spécifier par une illustration puisque le dessin reste le même quand le personnage appuie sur la canne et quand il n'appuie pas. Les illustrations choisies par l'enseignant sont affublées de signes représentant un effort de la part du personnage - des traits et étoiles disposés autour de la tête du personnage - mais cela ne désigne en tout cas pas le sens dans lequel s'exerce la force appliquée par le personnage, ni ce sur quoi il exerce son effort.

L'hypothèse d'un ancrage de la schématisation des élèves qui fournissent des réponses ambiguës dans une interprétation de l'illustration plutôt que du contenu verbal de la consigne, permet-elle de rétablir la cohérence de ces réponses pour la posture (c) ? Ci-dessous, j'examine cette question pour reconstruire les cheminements des élèves ayant produit les réponses ambiguës, en procédant dans l'ordre suivant :

I. Le point de vue de Germaine quant à la posture (c) donne l'indication du pèse-personne supérieure à celle de la posture (a) (comme la réponse escomptée conforme au modèle) et justifie sa réponse en faisant reposer le plafond sur la canne.

II. Le ou les points de vue de Annette et Sylvie quant à la posture (c) donne(nt) l'indication du pèse-personne identique à celle de la posture (a) (comme la réponse escomptée non conforme).

III. Le ou les points de vue de Barbara et Pierrette quant à la posture (c) donne(nt) l'indication du pèse-personne inférieure à celle de la posture (a).

Démarche d'analyse

Pour examiner l'hypothèse d'un ancrage par les élèves de la schématisation des réponses ci-dessus dans une interprétation de la partie illustrée de la consigne, je vais analyser les opérations d'ancrage (α ou η[467]) utilisées par les élèves. Je présente ci-dessous la liste des opérations pour chacune des réponses ambiguës ci-dessus, en indiçant leur formulation par le chiffre romain qui fait référence à la réponse ambiguë listée (comme suit : $_{I}$, $_{II}$ ou $_{III}$). Si ces opérations logico-discursives permettent de rendre compte des schématisations des élèves en toute cohérence et avec pour *notions primitives* des éléments visuels des illustrations des postures concernées, je considérerai cette hypothèse valide.

Premier cheminement (Germaine) : *de l' |illustration| à une indication supérieure*

Voici pour rappel la réponse écrite de Germaine à l'item #2 du questionnaire :

Réponse de Germaine à la posture (c) - item #2

```
Germaine:
     c) supérieure (poid en plus, partie du plafond qui appui en plus par la canne)
```

Pour cette analyse, je traite la justification que Germaine fournit dans sa réponse ("partie du plafond qui appui en plus par la canne") comme un *déterminé* progressivement construit par les opérations suivantes :

$\alpha_{I.1}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| $\Rightarrow$ {partie du plafond}

$\eta_{I.2}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| $\Rightarrow \pm appuyer$

$\mu_{I.3}$: $\pm appuyer \Rightarrow \pm appuyer\ en\ plus.$

$\alpha_{I.4}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| $\Rightarrow$ {canne}

$\delta_{I.5}$: {partie du plafond}, {canne}, $\pm appuyer\ en\ plus \Rightarrow$ ($-$, que partie du plafond appuyer en plus par la canne)

Cependant, il est plus simple et suffisant dans ce cas, à mon avis, de considérer la subordonnée relative "qui appui en plus par la canne" comme une adjonction (ou précision) de {partie du plafond}, ce qui permet de considérer l'ensemble comme une classe-objet. Comme l'argumente Grize (1996) dans l'exposé de sa

467. En l'occurrence, puisqu'il s'agit d'interpréter une interaction entre la canne et un autre objet, c'est plus souvent un prédicat - et donc une opération η - qui permet de schématiser dans le discours ce qui est représenté par l'illustration.

théorie, il pourrait exister une langue où nous disposons dans le lexique d'un mot qui signifie exactement le contenu d'une paraphrase quelconque, comme dans ce cas "partie du plafond qui appui en plus par la canne". En procédant à cette simplification, la justification fournie par Germaine dans sa réponse peut se décrire par une seule opération, l'introduction d'une classe-objet très spécifique :

$\alpha_{I.6}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| ⇒ {partie du plafond qui appui en plus par la canne}

L'hypothèse d'une interprétation à partir de l'illustration est particulièrement convaincante pour reconstruire le point de vue de Germaine, du fait que le plafond est effectivement représenté sur la partie illustrée de la consigne par un rectangle gris qui flotte au-dessus du personnage, coupé à gauche et à droite sans reposer sur aucun mur, du fait que Germaine schématise ce rectangle gris "partie du plafond". Cette lecture de l'illustration va dans le sens d'un objet que le personnage doit retenir avec la canne, qui lui tomberait dessus, et conduit Germaine à introduire un objet de discours inattendu dans sa schématisation : la classe-objet {partie du plafond qui appui en plus par la canne}.

Deuxième cheminement (Annette et Sylvie) : *de l' |illustration| à une indication identique*

Annette et Sylvie n'ont pas seulement une réponse semblable à la question de l'item #2 pour la posture (c), elles argumentent également de manière convergente l'une avec l'autre. Je vais commencer par analyser la schématisation de Sylvie, car elle fournit une réponse avec une justification plus développée, présentée ci-dessous pour rappel :

Réponse de Sylvie aux postures (a) et (c) - item #2

```
Sylvie:
    a. pcq même situation
    c. le poid est le même, même si la canne touche le plafond
    pour le c: si l'homme appuie fortement contre le plafond le poids sera supérieur
```

La schématisation de Sylvie pour la posture (c) est une *configuration* progressivement construite par les opérations suivantes[468] :

$\gamma_{II.1}$: {[indication sur le pèse-personne]} ⇒ {[indication sur le pèse-personne], poids}

$\eta_{II.2}$: |RAISONNEMENT DE SYLVIE| ⇒ $\pm$*être le même*

$\alpha_{II.3}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| ⇒ {canne}

$\alpha_{II.4}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| ⇒ {plafond}

$\eta_{II.5}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| ⇒ $\pm$*toucher*

$\delta_{II.6}$: {poids}, $\pm$*être le même* ⇒ (−, que le poids être le même)

$\delta_{II.7}$: {canne}, {plafond}, $\pm$*toucher* ⇒ (−, que la canne toucher le plafond)

$\tau_{II.8}$: $d_{II.6}$, $d_{II.7}$ ⇒ (−, que le poids être le même) $\xrightarrow{même\ si}$ (−, que la canne toucher le plafond)

468. Comme la réponse est liée à la justification par une organisation raisonnée (opération τ), je n'ai pas pu analyser uniquement la justification comme je l'ai fait pour Germaine.

La reconstruction des notions primitives est évidemment une partie particulièrement délicate de l'analyse, puisqu'elle ne repose justement pas sur les traces discursives laissées par les élèves. Si les notions primitives dans lesquelles sont ancrées les classes-objets {canne} et {plafond} se trouvent probablement [469] sur la partie illustrée de la consigne concernant la posture (c), que j'ai notée |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)|, il paraît encore plus probable que $\pm toucher$ soit ancré dans cette illustration, notamment du fait que la partie discursive de la consigne ne fait pas du tout usage de ce prédicat. Le prédicat $\pm$être *le même*, par contre, n'a aucune référence dans l'illustration et procède plutôt du raisonnement de Sylvie. La classe-objet {poids} ne peut pas non plus être ancrée dans la partie illustrée : il faudrait pour cela pouvoir lire l'indication sur le pèse-personne, et ce n'est évidemment pas le but de rendre cette indication *lisible*, puisque l'exercice invite les élèves à l'inférer à partir des autres informations. J'ai donc traité l'introduction de cet objet dans la schématisation de Sylvie comme une opération d'élaboration de la classe-objet {indication sur le pèse-personne} utilisée dans la partie discursive de la consigne, et entouré cette partie de la schématisation de Sylvie de crochets ("[ ]") pour désigner son caractère implicite dans la communication de Sylvie. Je fais ainsi l'hypothèse que cette classe-objet est reprise par Sylvie du discours que l'enseignant a rédigé sur la consigne de l'item #2.

Sylvie *met en relation* le poids et l'interaction entre la canne et le plafond, par une organisation raisonnée ($\tau_{II.8}$) qui constitue la meilleure trace discursive de son raisonnement pour répondre à la question. Ce n'est cependant pas dans cette opération-ci que se joue la situation de malentendu. Selon mon hypothèse d'un ancrage dans la partie illustrée de la consigne, c'est l'interaction entre la canne et le plafond qui fait l'objet de schématisations diverses. Sylvie schématise cette interaction par l'opération $\delta_{II.7}$, qui produit le déterminé ($-$, que la canne toucher le plafond). L'interaction entre la canne et le plafond est spécifiée par l'usage du prédicat $\pm toucher$. Le choix de ce prédicat (l'opération $\eta_{II.5}$) fournit un indice à une interprétation de l'illustration comme désignant un contact sans pression entre la canne et le plafond, un "toucher" où aucune force n'est exercée par la canne sur le plafond, ni inversement.

Selon cette hypothèse, l'opération $\eta_{II.5}$ qu'effectue Sylvie en introduisant le prédicat $\pm toucher$ diffère de l'opération $\eta_{I.2}$ qu'effectue Germaine en introduisant le prédicat $\pm appuyer$. Cette hypothèse permet de considérer que l'analyse des forces effectuée par Sylvie est conforme au modèle enseigné.

La réponse de Sylvie nous fournit un indice supplémentaire en faveur de cette hypothèse : Sylvie ajoute une note à la fin de sa réponse, en partant d'une autre interprétation de la posture (c) : "pour le c : si l'homme appuie fortement contre le plafond le poids sera supérieur". Sans analyser dans le détail cette adjonction de Sylvie à sa première réponse, nous pouvons rapidement constater, d'une part, que le fait de fournir deux réponses selon l'interprétation retenue de la posture (c) corrobore l'hypothèse d'une situation de malentendu et, d'autre part, que dans cette adjonction Sylvie produit une schématisation conforme au modèle enseigné, ce qui laisse penser qu'elle est également capable de raisonner conformément au modèle enseigné lorsqu'elle interprète l'interaction entre la canne et le plafond comme un "toucher" sans pression.

469. Ces classes-objets pourraient simplement être reprises θ) de la partie discursive de la consigne, mais elle prendrait alors un sens plus général que celui spécifique à la posture (c). En effet, il ne s'agit pas pour l'élève de parler de la canne *en général*, mais de la canne *dans la posture (c) du personnage*, or, cette canne-ci n'est spécifiée que dans la partie illustrée, le discours ne la différenciant pas des cannes dans les autres postures en faisant toujours usage du même mot "canne".

Le point de vue reconstruit pour Sylvie peut-il être attribué à Annette ?

Annette donne pour réponse que l'indication sur le pèse-personne en (c) est identique à la posture (a), parce que "le poids reste le même". Vu la comparaison avec la posture (a), il s'agit également de faire des hypothèses sur sa schématisation de la posture de référence (a). À cette fin, je fournis ci-dessous pour rappel l'ensemble de sa réponse écrite complète à l'item #2 du pré-questionnaire :

Réponse de Annette au pré-questionnaire - item #2

```
Annette:
    Dans la situation b), l'indication sur le pèse-personne est inférieure à celle
    de la situation a), parce que l'homme ne soulève pas la canne qui ne repose pas non
    plus sur le pèse-personne.
    Situation c): L'indication est la même que pour la situation a) le poids reste le
    même.
    Situation d): L'indication est plus lourde que dans la situation a) car le poids de
    la canne repose complètement sur le pèse-personne.
```

Du point de vue d'Annette, c'est comme si le plafond présent dans la posture (c) ne changeait rien. La réponse d'Annette ne fournit pas d'opération logico-discursive spécifiant la relation entre le plafond et la canne, à partir de laquelle nous pourrions tester notre hypothèse d'un ancrage dans la partie illustrative de la consigne. De plus, la comparaison à l'identique effectuée par Annette avec la posture (a) pourrait se comprendre de plusieurs manières : Annette considérerait peut-être qu'en (a) le fait de tenir la canne ne change pas le poids sur le pèse-personne. En effet, dans sa réponse pour la posture (d) Annette considère que la canne qui "repose" sur le pèse-personne conduit à une indication "plus lourde" sur le pèse-personne. Cependant, cette interprétation semble contredite par sa réponse pour la posture (b), où Annette considère l'indication inférieure "parce que l'homme ne soulève pas la canne qui ne repose pas non plus sur le pèse-personne". Au fond, la schématisation qui émerge de l'ensemble des réponses fournies par Annette pour cet item #2 semble indiquer qu'elle utilise deux critères cumulatifs pour décider du poids :

— "l'homme soulève la canne" ;

— "la canne repose sur le pèse-personne".

Comme dans les postures (a) et (c) un seul des deux critères est rempli, le poids est considéré identique. Dans la posture (b) aucun critère n'est rempli, le poids est considéré moindre, et comme dans la posture (d) les deux critères sont remplis, le poids est considéré supérieur. Si nous ne disposons pas d'une opération logico-discursive pour spécifier l'interaction entre la canne et le plafond en (c), le cheminement de pensée ainsi reconstitué fournit néanmoins l'indice d'un traitement de la consigne à partir de l'illustration, puisque les deux critères ci-dessus se vérifient visuellement à partir de l'illustration. En effet, si Annette avait procédé à partir de la partie discursive de la consigne, elle aurait fait la différence entre (a) et (c), puisqu'en (a) la consigne spécifique que "la personne est debout sur le pèse-personne avec la canne à la main" alors qu'en (c) elle est "debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le plafond". Sur la base de cette reconstruction du cheminement de Annette, je vais utiliser pour spécifier l'interaction entre la canne et le

plafond en (c) le seul prédicat qu'utilise Annette pour spécifier l'interaction entre la personne et la canne : $\pm soulever$ (•). Ce prédicat est explicite dans sa réponse pour la posture (b). Annette semble s'arrêter là dans sa schématisation, puisqu'elle ne schématise pas l'interaction entre la canne et le plafond.

L'hypothèse d'une reprise implicite du prédicat $\pm soulever$ (la personne, la canne) pour la posture (c), voire pour l'ensemble des postures, permettrait d'énoncer l'opération suivante :

$\eta_{II.9}$: |ILLUSTRATION DES POSTURES| ⇒ $\pm soulever$ (la canne)

Cette hypothèse d'une opération $\eta_{II.9}$ paraît d'autant plus probable que l'analyse de la réponse de Sylvie permet de mettre en évidence la nuance entre deux prédicats : $\pm toucher$ et $\pm appuyer$. Il me semble cohérent de considérer que Sylvie et Annette partagent une même compréhension du type d'interaction entre la canne et le plafond, que Sylvie schématise par $\pm toucher$ et qu'Annette ne schématise pas, mais dont on peut inférer, à partir de $\pm soulever$ (la canne), qu'elle considère néanmoins aussi qu'il y a un contact sans pression entre la canne et le plafond. Annette utiliserait aussi pour la posture (c), selon cette hypothèse, le prédicat qu'elle emploie pour (b), c'est-à-dire $\pm soulever$ (la canne). Ces prédicats convergent entre eux pour ce qui est d'une analyse des forces, mais divergent de celui de la consigne, à savoir $\pm appuyer$ (sur le plafond). Si l'on accepte cette analyse, c'est bien une divergence dans l'interprétation du type d'interaction entre la canne et le plafond à partir de l'illustration qui rétablit la cohérence des réponses de Annette et Sylvie : elles auraient pensé que le personnage maintient la canne en contact sans appuyer sur le plafond, à la manière d'un artiste du cirque qui tient une tige au bout du doigt, ou d'un artisan qui pose son mètre dépliant pour effectuer une mesure avec un mètre flexible[470].

Troisième cheminement (Barbara et Pierrette) : *de l' |illustration| à une indication inférieure*

Barbara et Pierrette considèrent l'indication du pèse-personne en (c) inférieure à celle de la posture (a), ce qui ne correspond ni à la réponse conforme escomptée, ni aux difficultés escomptées. Cette réponse peut-elle s'expliquer[471] par une interprétation spécifique de l'interaction entre la canne, le personnage et le plafond ? Barbara schématise explicitement l'interaction entre la canne et le plafond dans une parenthèse lors sa réponse pour la posture (c), reproduite ci-dessous pour rappel :

Réponse de Barbara à la posture (c) - item 2

```
Barbara:
     c est < a car le plafond enlève une partie du poids (car on la colle au plafond)
```

La réponse de Barbara pour la posture (c) fournit deux justifications imbriquées : l'une relative à l'action du plafond sur le poids ("le plafond enlève une partie du poids"), l'autre relative à l'action du personnage sur la canne ("on la colle au plafond"). Cette réponse contient de nombreuses opérations avec lesquelles nous pouvons comparer la schématisation de l'enseignant pour identifier d'éventuelles divergences, en particulier

470. Si l'artisan appuie, le mètre se plie et la mesure n'est plus exacte.

471. Plus modestement, il s'agit de proposer une reconstruction du point de vue de ces élèves qui puissent faire valoir la cohérence de leur raisonnement, allant au-delà de l'impression d'étrangeté que donne cette réponse à la première lecture.

quant à l'interaction entre la canne et le plafond. Dans le but de simplifier la présentation des opérations effectuées par Barbara, je n'y ai pas inclus la réponse elle-même et je prends les deux justifications l'une après l'autre.

La première se construit avec les opérations suivantes :

$\alpha_{III.1}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE| (c)| ⇒ {plafond} [a]

$\eta_{III.2}$: |RAISONNEMENT DE BARBARA| ⇒ $\pm enlever$

$\alpha_{III.3}$: |RAISONNEMENT DE BARBARA| ⇒ {une partie du poids}

$\delta_{III.4}$: {plafond}, {partie du poids}, $\pm enlever$ ⇒ (−, que le plafond enlever une partie du poids)

a. Identique à $\alpha_{II.4}$

Cette analyse met en évidence un raisonnement de Barbara qui reste difficile à reconstituer sans indices supplémentaires. Peut-être la suite nous fournira les indices manquants.

La seconde justification se construit avec les opérations suivantes :

$\alpha_{III.5}$: |?| ⇒ {on} [a]

$\theta_{III.6}$: [{canne}] ⇒ {la}

$\eta_{III.7}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| ⇒ $\pm coller$

$\theta_{III.8}$: {plafond} ⇒ {plafond}

$\delta_{III.9}$: {on}, {canne}, {plafond}, ±coller ⇒ (−, que on coller la [canne] au plafond)

$\tau_{III.10}$: $d_{III.4}$ $d_{III.9}$ ⇒ (−, que le plafond enlever une partie du poids) $\xrightarrow{car}$ (−, que on coller la [canne] au plafond)

a. Cette opération est difficile à reconstituer, car le terme "on" peut avoir plusieurs référents dans ce contexte : il pourrait être la marque énonciative du locuteur, dans le sens implicite de "on décide de coller la canne..." ou pourrait aussi désigner "la personne" citée dans la partie discursive de la consigne, ou le personnage illustré, ou encore un autre acteur qui aurait préparer la dispositif constitué d'une canne collée au plafond pour lui permettre de s'y tenir lorsqu'il monte sur le pèse-personne. Ne sachant comment trancher entre ces hypothèses, j'ai choisi une opération d'ancrage introduisant une classe-objet, qui me semble la solution la plus neutre, mais je renonce à inférer une notion primitive dans un cas aussi difficile.

Parmi toutes ces opérations, c'est surtout l'introduction du prédicat $\pm coller$ ($\eta_{III.7}$) qui nous renseigne quant à notre hypothèse, ici. L'ancrage de ce prédicat dans la partie illustrative de la consigne ne fait guère de doute, puisque Barbara aurait lu $\pm appuyer$, et non $\pm coller$, sur la partie discursive de la consigne. Le terme utilisé par Barbara ("coller") peut néanmoins encore prendre des sens différents en physique, au sens d'une analyse des forces. Avant de discuter le sens que prend le plus probablement ce prédicat du point de vue de Barbara, examinons d'abord la schématisation de Pierrette, qui peut nous aider à décider.

Pierrette répond à la posture (c) en effectuant un renvoi explicite à sa réponse pour la posture (b). Dès lors, je reproduis ci-dessous les deux réponses pour rappel à savoir "il transmet son poids sur la canne". Voici pour rappel sa réponse écrite complète à l'item #2 du pré-questionnaire :

Réponse de Pierrette aux postures (b) et (c) - item #2

```
1 Pierrette:
```

```
    b) inférieure -> il transmet son poids sur la canne
    c) inférieure -> idem que b
```

En (b), "il" fait référence au personnage, présent sur l'illustration, plutôt qu'à "la personne" - le terme utilisé dans la partie discursive de la consigne - qui est au féminin et nécessiterait une reprise avec le terme *elle*. Dans la posture (c), la canne est en contact avec le plafond ,et non avec le sol comme en (b). Pour appliquer la réponse de Pierrette en (b) à la posture (c), il s'agit donc de considérer que le personnage "transmet son poids sur la canne" alors que celle-ci est orientée vers le haut. Cette schématisation pourrait s'expliciter ainsi : "[le personnage] transmet son poids sur la canne [au plafond]".

La justification partiellement implicite de Pierrette se construirait alors avec les opérations suivantes :

$\alpha_{III.11}$: |ILLUSTRATION DES POSTURES| ⇒ [{personnage, il}]

$\eta_{III.12}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (b)| ⇒ $\pm transmettre$

$\alpha_{III.13}$: |RAISONNEMENT DE PIERRETTE| ⇒ {poids}

$\alpha_{III.14}$: |ILLUSTRATION DES POSTURES| ⇒ {canne} [a]

$\alpha_{III.15}$: |ILLUSTRATION DE LA POSTURE (c)| ⇒ [{plafond}] [b]

$\delta_{III.16}$: [{personnage}], {poids}, {canne}, [{plafond}] $\pm transmettre$ ⇒ (−, que [le personnage] transmettre son poids sur la canne [au plafond])

a. Identique à $\alpha_{II.3}$
b. Identique à $\alpha_{II.4}$ et $\alpha_{III.1}$

Dans cette schématisation, Pierrette utilise le prédicat $\pm transmettre$ (son poids, sur la canne), sans développer sa schématisation jusqu'à l'explicitation de l'interaction entre la canne et le plafond. Par contre, sa référence à la réponse (b), prise à la lettre, permet de reconstituer la schématisation implicite de cette interaction avec le même prédicat, appliqué à la canne. Par transmission des forces, cette schématisation met en scène un personnage qui transmet son poids sur la canne alors que celle-ci est au plafond. Autrement dit, le personnage se suspendrait à la canne de manière à réduire le poids qu'il exerce sur le pèse-personne...

En revenant à la schématisation de Barbara, nous disposons pour ces deux élèves d'indices différents mais convergent qui spécifient une interaction entre la canne et le plafond encore inédite jusque là : la canne est "collée" au plafond, et le personnage y "transmet son poids", c'est-à-dire qu'il s'y suspend. Pour les deux élèves, il y a transmission d'une partie du poids du personnage au plafond, avec des nuances quant à qui est le sujet des prédicats : c'est tantôt le "plafond" qui "enlève une partie du poids", tantôt le personnage qui "transmet son poids". L'hypothèse d'opérations d'ancrage à partir de l'illustration de la consigne fonctionne bien pour rétablir la cohérence de ces réponses, et plus particulièrement les opérations η qui permettent d'identifier les divergences dans la construction des schématisations des élèves et de l'enseignant relatives à l'interaction entre la canne et le plafond pour la posture (c), comme nous l'avions également constaté pour les cheminements I (Germaine) et II (Annette et Sylvie).

Cette analyse nous a permis de montrer les divergences entre les schématisations des élèves et de rétablir la cohérence des points de vue des élèves, et même la conformité de leur raisonnement au modèle enseigné. Le point de vue de Germaine (I) paraît cohérent parce que si le plafond n'est pas suspendu, mais repose uniquement sur la canne, l'indication du pèse-personne sera effectivement supérieure en (c) par rapport à la posture (a), conformément au modèle enseigné. Le point de vue d'Annette et Sylvie (II) paraît cohérent, parce que si l'interaction entre la canne et le plafond est comprise comme un toucher sans pression, alors l'indication sur le pèse-personne est effectivement égale en (c) et en (a) selon le modèle enseigné. Le point de vue de Barbara et Pierrette (III) paraît cohérent parce que si l'illustration de la posture (c) est comprise comme représentant une canne collée au plafond, le personnage se retient à la canne et l'indication du pèse-personne est inférieure en (c) par rapport à la posture (a). Ce raisonnement est également conforme au modèle enseigné, et permet à ces élèves d'interpréter les traits autour de la tête du personnage comme un effort pour se soulever, appliquant une force dans la même direction mais de sens contraire à celle schématisée par l'enseignant.

6.4.4 Enquête quant à une situation de malentendu pour les trois cheminements

6.4.4.1 Première hypothèse : *interactions diverses entre la canne et le plafond*

L'analyse et reconstruction des cheminements des élèves nous a conduit à considérer que les élèves interprètent de manières diverses les interactions entre la canne et le plafond, selon l'une ou l'autre des trois variantes suivantes :

(i) Le personnage appuie sur la canne, la pousse vers le haut contre le plafond.

(ii) Le personnage tient la canne par la main de manière à ce qu'elle soit en contact avec le plafond sans qu'elle exerce la moindre force sur le plafond, comme on le fait par exemple pour prendre des mesures à l'aide d'un mètre dépliant.

(iii) Le personnage se retient à la canne qui est collée au plafond.

La schématisation de l'enseignant ne considère que la variante (i), qui conduit à fournir la réponse suivante à la question de l'exercice : l'indication du pèse-personne est supérieure en (c) qu'en (a). La variante (ii) conduirait à répondre que l'indication sur le pèse-personne est identique dans les postures (c) et (a), et la variante (iii) qu'elle est même inférieure en (c).

Cette hypothèse quant à une éventuelle *situation de malentendu* pourrait rétablir la cohérence des points de vue exprimés par les cinq élèves produisant une réponses ambiguë, non seulement pour la posture (c) mais aussi pour la posture (b). En effet, par analogie, l'interaction entre la canne et le sol représentée dans la posture (b) du personnage, pourrait être interprétée comme si le personnage tenait la canne avec son extrémité inférieure à la hauteur du sol, en retenant néanmoins la canne ou en la laissant appuyer sur le sol de son poids - comme le fait l'enseignant. Pierrette imagine encore une troisième possibilité, puisqu'elle interprète l'illustration comme représentant le personnage qui s'appuie sur la canne - après tout une canne

est faite pour ça ! - en transmettant une partie de son propre poids au sol sans passer par le pèse-personne. Seulement, dans ce cas comme dans l'interprétation de l'enseignant, l'indication sur le pèse-personne à la posture (b) est considérée comme inférieure à celle de la posture (a), de telle sorte que ce cheminement différent ne conduit pas Pierrette à fournir une réponse divergente à la question posée.

Pour décider s'il y a situation de malentendu, les cheminements des élèves doivent encore être comparés à celui de l'enseignant de manière à montrer que (1) il y a une divergence dans les schématisations et (2) cette divergence procède d'une reprise par les élèves d'une (partie de la) schématisation de l'enseignant. Comme nous disposons déjà des opérations logico-discursives utilisées par les cinq élèves ayant produit des réponses ambiguës, il suffit à présent d'analyser la ou les opérations correspondantes dans la schématisation de l'enseignant (que j'indicerai de la lettre E, comme suit : $_E$) pour chaque opération ou groupe d'opérations ainsi décrites, pour les comparer et décider s'il y a *situation de malentendu*. Le tableau 6.1 ci-dessous présente de manière synthétique les opérations η des schématisations des élèves, selon les points de vue.

Point de vue :	Germaine	Annette et Sylvie	Barbara et Pierrette
Résultat des opérations :	$\pm appuyer\ en\ plus$	$\pm toucher$ [$\pm soulever\ la\ canne$]	$\pm enlever\ une\ partie\ du\ poids$ $\pm coller$ [$\pm transmettre$]

TABLE 6.1 – Résultat des opérations η et μ qualifiant les interactions entre le personnage, la canne et le plafond dans les réponses à l'item #2, posture (c).

Ces opérations permettent de rendre compte des réponses des élèves par un ancrage dans l'illustration de la posture (c), et permet de dégager, comme point focal de la divergence entre les schématisations de ces élèves et celle de l'enseignant, les opérations η et μ qualifiant les interactions entre le personnage, la canne et le plafond. Quelles sont les opérations correspondantes dans la schématisation de l'enseignant ?

A chacune des postures du personnage correspondrait une ou des opérations procédant du discours de la consigne ou de l'enseignant, indicées E, qui spécifient ce type d'interaction. Comme toutes les réponses ambiguës concernent la posture (c), il suffit ici de reconstruire une formulation de la ou les opérations concernant le type d'interaction que la canne entretient avec le personnage et avec le plafond dans cette posture, pour décrire de manière simplifiée le point de vue de l'enseignant.

Nous avons posé l'hypothèse que les opérations des élèves au sujet du type d'interaction entre la canne et le plafond en (c), procèdent à partir de l'illustration, et que des opérations partant de la description verbale de la posture (c), à savoir "le personnage est debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le plafond" correspondrait à celles des élèves dans la schématisation de l'enseignant. Selon cette hypothèse, l'enseignant pourrait extraire la classe-objet qualifiant l'interaction entre la canne et le plafond de la consigne écrite, ce qui s'exprimerait en logique naturelle avec une opération d'extraction ω :

$\omega_{E.0}$ **:** (−que le personnage être debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le plafond) ⇒ {?}

Cependant, je ne trouve nulle part dans la schématisation de l'enseignant une classe-objet qui serait ainsi constituée, ce que j'ai mentionné par "{ ?}". Il faut donc poursuivre l'analyse et examiner d'autres opérations, plus en détail. Voici, pour rappel, ce que l'enseignant verbalise dans son discours à la phase 5 de la séquence, où j'ai mis en évidence l'entassement syntagmatique (Blanche-Benveniste, 1997) de manière à souligner la structure de la langue orale de l'énoncé :

Enregistrements vidéo en classe - Institutionnalisation de l'item #2

```
1          on va                        s'appuyer sur le plafond (.)
2  donc    on a (.) le support applique une force sur le plafond
3  et bien sûr
4                  le plafond applique une autre force
5
```

Demi-classe B - 27.02.2007 04'10" à 7'19"

La configuration de l'enseignant se construit avec les opérations suivantes :

$\eta_{E.1}$: |...| ⇒ ±s'appuyer sur (•, •)

$\alpha_{E.2}$: |...| ⇒ {plafond}

$\delta_{E.3}$: {plafond}, ±s'appuyer sur (•, •), ⇒ (−, que s'appuyer sur le plafond)

$\sigma_{E.4}$: $d_{E.3}$ ⇒ $\frac{on,\ va}{(-,\ que\ s'appuyer\ sur\ le\ plafond)}$

$\alpha_{E.5}$: |...| ⇒ {support}

$\eta_{E.6}$: ⇒ ±appliquer une force sur (•)

$\theta_{E.7}$: {plafond} ⇒ {plafond}

$\delta_{E.8}$: {support}, {plafond}, ±appliquer une force sur (•), ⇒ (−, que le support appliquer une force sur le plafond)

$\sigma_{E.9}$: $d_{E.8}$ ⇒ $\frac{on,\ a}{(-,\ que\ le\ support\ appliquer\ une\ force\ sur\ le\ plafond)}$

$\tau_{E.10}$: $s_{E.4}$, $s_{E.9}$ ⇒ $s_{E.4} \xrightarrow{donc} s_{E.9}$

$\eta_{E.12}$: ⇒ ±appliquer une autre force [sur] (•)

$\delta_{E.13}$: {plafond}, ±appliquer une force sur (•), ⇒ (−, que le plafond appliquer une autre force [sur le support])

$\tau_{E.14}$: $s_{E.9}$, $d_{E.13}$ ⇒ $s_{E.9} \xrightarrow{et\ bien\ sûr} d_{E.13}$

Cet extrait de discours ne se résume pas à une simple extraction ω à partir de description verbale de la posture (c) dans la consigne écrite, parce qu'il effectue des transformations qui construisent une configuration que l'on ne peut simplement *extraire* ("déduire") de la consigne écrite, comme ce serait le cas avec l'opération ω. En particulier, il passe du prédicat $\pm appuyer$ sur le plafond à $\pm appliquer\ une\ force\ sur$ le plafond, du déterminé (−, que la canne appuyer sur le plafond) à (−, que on va s'appuyer sur le plafond), et enfin du déterminé (−, que le support appliquer une force sur le plafond) à (−, que le plafond appliquer une autre force), cette dernière transformation étant justifiée par le "principe d'action et de réaction". L'enseignant explicite les opérations d'organisation raisonnée τ, avec des termes "donc" et "et bien sûr", et la configuration qui en résulte a une structure argumentative qui se repose sur ses propres connaissances du modèle enseigné, en particulier "le principe d'action et de réaction" faisant office de "*loi de passage*" ou "*garantie*" dans le modèle de Toulmin en théorie de l'argumentation (Plantin, 1996, p. 23). Le lien

logique de $\tau_{E.10}$ repose sur le principe d'action et réaction, la loi de la somme des forces, et le lien logique $\tau_{E.14}$ sur l'usage du modèle enseigné à une interaction entre des objets qu'il qualifie en langue naturelle par $\pm appuyer$, autrement dit le lien logique déductif $\tau_{E.14}$ procède du sens que prend *en physique* le prédicat $\pm appuyer$ qu'utilise l'enseignant dans sa schématisation.

On pourrait argumenter que si l'enseignant n'extrait aucune classe-objet, il extrait peut-être de la consigne écrite un prédicat. Nous avons vu en analysant les réponses des élèves que le type d'interaction entre la canne et le personnage et le plafond est plutôt schématisé par des prédicats que par des classe-objets. C'est également le cas dans la consigne, faisant usage du participe présent "appuyant". Or, Grize (1996) ne propose pas dans son modèle d'équivalent à l'opération ω pour l'extraction d'un prédicat à partir d'une configuration d'énoncés [472].

Cependant, même si nous disposions d'une opération $\upsilon_{E.0}$ pour l'extraction d'un prédicat à partir d'une configuration, qui nous permettait de poser l'hypothèse que l'enseignant procéderait à partir de la consigne verbale de l'exercice, on constate que $\upsilon_{E.0}$ ne permettrait d'introduire dans sa schématisation que le premier prédicat, $\pm s'appuyer\ sur$. Autrement dit, cette opération ne remplace que $\eta_{E.1}$ et ne rend néanmoins pas compte des transformations ultérieures, en particulier $\eta_{E.6}$ et $\eta_{E.12}$. L'hypothèse que l'enseignant procéderait à partir de la consigne écrite paraît assez peu probable au vu de cette analyse.

6.4.4.2 Énonciation des divergences selon les points de vue

Nous avons vu que l'hypothèse que l'enseignant réfléchirait à partir de la consigne écrite pour proposer sa schématisation est peu probable. Dans le contexte scolaire, ce serait d'ailleurs assez étonnant de voir l'enseignant tenter d'effectuer la tâche donnée aux élèves comme s'il n'y avait rien d'autre à faire que déduire la réponse de la consigne [473]. La schématisation rédigée en consigne se construit plus probablement dans l'autre sens : l'enseignant part de ses connaissances du modèle enseigné pour rédiger la consigne. Il s'agit d'une direction d'ajustement opposée à celle des élèves, et cette inversion dans la perspective joue vraisemblablement un rôle dans la constitution d'une situation de malentendu. Tandis que les élèves font avec ce qui leur est donné en consigne, l'enseignant construit une consigne dans l'espoir de faire recourir les élèves à leurs connaissances. Il y du *jeu* [474] entre ces intentionnalités, une marge de manœuvre qui

472. Peut-être faudrait-il étendre l'opération ω aux prédicats. Alternativement, il faudrait peut-être introduire une nouvelle opération, υ, identique à ω sinon qu'elle extrait d'une configuration un prédicat au lieu d'une classe-objet. Cette nouvelle opération se justifierait par analogie entre la différence que fait Grize (1996) entre α et η. Elle remplacerait l'hypothèse d'une opération $\omega_{E.0}$ et s'écrirait :

$\upsilon_{E.0}$: (−que le personnage être debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le plafond) $\Rightarrow \pm s'appuyer\ sur$ (•, •)

Dans l'analyse de la schématisation de l'enseignant de la posture (c) de l'item #2 lors de la phase 5 de la séquence, une telle opération peut rendre compte de l'introduction du prédicat $\pm s'appuyer$, c'est-à-dire que nous aurions l'opération $\upsilon_{E.0}$ au lieu de $\eta_{E.1}$.

473. Comme l'expose en détail Brousseau (1998/2004) dans sa théorie des situations didactiques, l'enseignant a généralement cette idée que la tâche ne doit pas être si facile, sans quoi il n'y aurait aucune connaissance mobilisée. Personnellement, plus j'y réfléchis, plus je trouve cette idée étrange : à quoi peut-il bien servir de tendre des "pièges conversationnels" aux élèves à travers un processus de dévolution dont une partie est délibérément laissée implicite ? Je ferais plutôt l'hypothèse que c'est en maximisant la compréhension mutuelle que les élèves développent des connaissances ; et tant pis pour l'évaluation.

474. Il s'agit d'une référence à la théorie des situations didactiques (Brousseau, 1998/2004), dans laquelle le concept de *jeu* joue un rôle fondamental, tant le *jeu* comme marge de manœuvre que comme activité ludique aux probabilités de succès

laisse la possibilité de développer des divergences. Quand il y a *situation de malentendu*, que les points de vue ne se rencontrent pas, les élèves peuvent produire une schématisation considérée comme erronée - c'est le cas dans cette situation - alors qu'ils ont raisonné conformément au modèle enseigné. De plus, l'enseignant échoue à observer les connaissances des élèves - à en faire le diagnostic - puisqu'il ne peut, dans le meilleur des cas, que constater un problème d'interprétation de la consigne et, éventuellement, attribuer aux élèves un manque de connaissances sur la base d'une situation de malentendu qui ne permet, en fait, aucun diagnostic des connaissances des élèves.

Nous avons identifié une situation de malentendu portant sur la type d'interaction entre la canne et le plafond, en montrant que même si les interprétations divergentes des élèves ne divergent pas toutes de la même manière, elles procèdent toutes de la partie illustrative de la consigne et ont toutes pour objet l'interaction entre la canne et le plafond [475], ce qui m'a permis de considérer qu'il s'agit d'une même situation de malentendu.

Au vu des analyses effectuées, il me semble qu'il y a au moins deux manières d'exprimer la divergence entre la schématisation de ces cinq élèves et celle de l'enseignant, qui correspondent à la double dimension d'une schématisation (*produit* et *processus*) :

au niveau de la schématisation en tant que produit par les opérations décrites : les élèves et l'enseignant divergent quant à l'interaction entre la canne et le plafond à la posture (c) ;

au niveau de la schématisation en tant que processus, les opérations elles-mêmes : les élèves procèdent de la partie illustrative de la consigne, alors que l'enseignant procède à partir de ses connaissances plutôt que de la consigne.

Décrire la situation de malentendu comme une divergence de prédicats dans la schématisation de l'enseignant et celles des élèves quant à l'interaction entre la canne et le plafond ne me semble pas suffisant, pour plusieurs raisons. Premièrement, deux élèves parmi les cinq produisant une réponse ambiguë (Annette et Pierrette) ne développent pas leur schématisation jusqu'à expliciter cette interaction entre la canne et le plafond. Cela montre que la divergence est plus profonde qu'il n'y parait : en effet, les élèves auraient aussi pu lire la partie discursive de la consigne où le verbe $\pm appuyer$ est utilisé. Deuxièmement, le choix des prédicats ne rend pas compte de la divergence dans sa totalité : Germaine, par exemple, utilise le même prédicat que l'enseignant ($\pm appuyer$), mais ce n'est plus le personnage qui "appuie", c'est le plafond. En outre, notre analyse de logique naturelle ne s'est pas intéressée uniquement à la *signification* de ces prédicats [476], mais bien au *sens* que les élèves donnent aux prédicats à ce moment-là. Troisièmement,

variables. J'aimerais cependant ajouter un troisième sens au *jeu* : quand "il y a du jeu" pour le mécanicien, c'est qu'il y a un espace vide entre les pièces, que ça va bouger et que l'on aura des problèmes... De même dans les processus d'interprétation analysés ici, ce "jeu" permet des mouvements dans la construction de la schématisation qui conduisent à la situation de malentendu discutée.

475. D'autres divergences entre la schématisation des élèves et celle de l'enseignant concernaient la transmission des forces à travers la canne et le personnage, et ont été rangée dans la catégorie "réponse erronées" du fait que l'enseignant schématise lui-même ces divergences comme des difficultés. Nous ne les discuterons pas dans la section suivante, consacrée uniquement à la situation de malentendu.

476. Si ce n'était qu'un problème de *signification*, il suffirait, pour ainsi dire, d'utiliser et faire utiliser le bon terme aux élèves : or, cela ne fonctionne justement pas en classe, car dans un *processus* d'apprentissage l'élève doit acquérir en même temps le

l'enseignant et les élèves divergent sur l'activité même qu'ils exercent : plus fondamental que le type d'interaction entre la canne et le plafond à la posture (c), les cinq élèves procèdent de l'illustration pour interpréter la question posée, alors que l'enseignant prend plutôt appui sur ses connaissances. C'est la recherche des notions primitives qui nous a conduit sur la piste de ce constat, qui me semble mettre en évidence l'importance de considérer également la schématisation comme un processus pour comprendre la construction d'une situation de malentendu : ici, Annette, Barbara, Germaine et Pierrette tentent de répondre à la question sans réfléchir à l'illustration à l'aune de leurs connaissances, sans quoi elles auraient perçu les risques d'une ambiguïté dans le dessin, comme le fait Sylvie en donnant une double réponse qu'elle fait dépendre de l'interprétation de l'illustration ("c. le poids est le même, même si la canne touche le plafond" et "pour le c : si l'homme appuie fortement contre le plafond le poids sera supérieur").

La question de l'élève lors de l'institutionnalisation (voir section 6.4.3.1, p. 497 et suivantes), met en évidence le fait que pour un élève au moins, cette interprétation des postures n'est toujours pas claire en fin de séquence, au moins pour la posture (b). Cette observation soulève la question suivante : comment les schématisations des cinq élèves participant à la situation de malentendu évoluent-elles au fil de la séquence ?

Dans la section suivante, je vais brièvement présenter l'évolution de la situation de malentendu au cours de la séquence d'enseignement, en montrant que celle-ci se résorbe au fil des activités, notamment à travers un échange verbal en classe durant lequel une élève prend conscience des différentes interprétations possibles de la consigne et demande un éclaircissement à l'enseignant. Cette interaction avec l'enseignant a lieu lors du travail avec Digalo sur l'item #2.

6.4.5 Evolution de la situation de malentendu portant sur *diverses interactions entre la canne et le plafond* pour la posture (c) du personnage

6.4.5.1 Du point de vue de l'enseignant

La question de la résolution éventuelle d'une situation de malentendu au cours d'une conversation s'articule également selon les points de vue des interlocuteurs. Autrement dit, l'enseignant peut résoudre la situation de malentendu pour les élèves sans le savoir : résolue *du point de vue des élèves*, la situation de malentendu n'est pas pour autant résolue - ni peut-être même reconnue - *du point de vue de l'enseignant*, c'est-à-dire que l'enseignant n'a pas lui-même *reçu* et *accepté* les schématisations divergentes construites par les élèves pour répondre à sa question.

Prenons rapidement un exemple de la nécessaire distinction de l'évolution d'une situation de malentendu *selon le point de vue* : la résolution orale de la comparaison des posture (b) et (a) du personnage par l'enseignant, à la phase 5 de la séquence (voir section 6.4.3.1, p. 497 et suivantes), tout à la fin de la séquence d'enseignement, suscite la question d'un élève sur l'interaction entre la canne et le sol :

vocabulaire et la signification, et est obligé dans ce but de faire un usage personnel et donner localement du *sens* - personnel aussi - aux termes pendant qu'il ou elle se les approprie.

Enregistrements vidéo en classe - Institutionnalisation de l'item #2

1 un élève: mais dans le cas b on s'appuie? ou pas?

Demi-classe B - 27.02.2007 04'10" à 7'19" ligne 31

Or, l'enseignant répond précisément sans effectuer d'enquête quant à la schématisation de l'élève, et par conséquent sans *recevoir* ni *accepter* d'éventuelles autres interprétations de la posture discutée (ici, la posture (b))[477] :

Enregistrements vidéo en classe - Institutionnalisation de l'item #2

1 E: alors juste (.) même si on on appuie (.) on aura toujours un poids plus petit que (.)
2 la première situation.

Demi-classe B - 27.02.2007 04'10" à 7'19" lignes 33-34

L'implicature de cette réponse, dans le contexte, consiste à considérer qu'il n'est pas important de savoir si le personnage appuie ou non sur la canne pour comparer les indications du pèse-personne entre les postures (a) et (b). Remarquons que cette implicature fonctionne du point de vue de l'enseignant, en référence au modèle enseigné, et pour la posture (b). Par contre, du point de vue des élèves et pour la posture (c), elle n'est plus valable, puisque dans les variantes des divergences décrites ci-dessus la qualification du type d'interaction entre la canne et le plafond change la réponse donnée par les élèves pour la posture (c). En outre, cette réplique implique que le but de l'activité consiste à donner la bonne réponse et non à comprendre la manière d'en décider. Une inversion est opérée à cette occasion par rapport à la situation didactique pour laquelle la question - et sa réponse - ne sont que des *prétextes* à un processus d'apprentissage.

A travers cet échange, l'élève qui interpelle l'enseignant semble assimiler la schématisation de l'enseignant lorsqu'il répond "plus petit encore" (*idem*, ligne 37), mais l'enseignant n'a probablement rien appris de plus sur la manière de schématiser de l'élève, sur les raisons qui l'ont conduit à poser cette question. En outre - et c'est peut-être encore plus important pour le processus d'apprentissage des élèves - si l'élève parvient à assimiler la schématisation de l'enseignant dans ce court échange dialogué, cela ne lui a pas forcément permis de construire une schématisation qui lui permet de répondre à toutes les postures de l'item, puisque l'implicature n'est valable que pour une des postures, et ne donne pas à l'élève les moyens d'évaluer sa pertinence dans d'autres cas. Pour apprendre le modèle enseigné de manière à répondre à toutes les postures de l'item #2, l'élève doit encore réussir à reconstruire la schématisation de l'enseignant en effectuant la bonne différenciation entre ce qui est général au modèle enseigné, et ce qui est particulier à la posture (c) dans la schématisation de l'enseignant. En outre, l'élève a encore pour tâche de faire le lien entre son raisonnement, qui le conduit à poser la question, et celui de l'enseignant, puisque l'enseignant n'intègre pas la schématisation de l'élève dans sa réponse, il n'explicite pas ce lien.

Vu la difficulté de la tâche d'interprétation dévolue à l'élève, celui-ci "abandonne" probablement sa première schématisation au profit de celle de l'enseignant, sans travailler à leur articulation. C'est ce qui s'observe souvent chez les élèves en milieu scolaire, et les conduit à donner des réponses (souvent) justes,

477. Pour la transcription complète de l'échange, voir section 6.4.3.1, page 497.

mais superficielles, au sens où ces réponses consistent en la répétition d'un morceau de discours plutôt qu'en la construction d'une schématisation à partir d'une représentation personnelle, d'une appropriation cognitive des savoirs enseignés.

Dès lors, il serait évidemment trop simple de penser que la situation de malentendu est résolue du simple fait que l'enseignant énonce à toute la classe : "pour le troisième cas on va s'appuyer sur le plafond". Il faut tenter de reconstruire les points de vue des cinq élèves à plusieurs moments de la séquence, pour montrer leurs éventuelles transformations.

Dans cette enquête, il s'agit de poser la question de l'articulation entre la schématisation divergente construite par un-e élève et celle de l'enseignant pour chaque point de vue : lors d'une éventuelle résolution de cette situation de malentendu du point de vue d'un-e élève, la première schématisation de l'élève est-elle simplement abandonnée au profit de celle de l'enseignant, ou est-elle intégrée à une schématisation plus complète, et jugée correcte du point de vue de l'enseignant, en tant que solution alternative ? Par exemple, les variantes (i), (ii) et (iii) pour la posture (b) sont-elles schématisées par l'enseignant ? Et les réponses pour la posture (c) selon les points de vue des élèves (I), (II) et (III), sont-elles intégrées à l'item #2 comme des réponses valables à des postures (e), où le plafond repose sur la canne, (f) où la canne ne fait que toucher le plafond sans y appuyer, et (g) où la canne est collée ou vissée au plafond et permet au personnage de se soulever ?

6.4.5.2 Introduction et traces disponibles

Pour mener cette enquête j'ai choisi quelques moments concernant une partie des cinq élèves concernés, en fonction des traces disponibles documentant les trois points de vue à suivre (voir Table 6.1, p. 508) et des moments où l'item #2 est travaillé dans la séquence.

La question du pré-questionnaire (item #2) est reprise lors de l'activité Digalo (phase 3 de la séquence, voir section 6.4.3.1, p. 497 et suivantes), puis lors des activités expérimentales avec du matériel concret (phase 4). Lors de l'activité Digalo, les élèves ne reçoivent pas non plus d'explications supplémentaires sur la consigne de la situation-problème. Lors de l'activité expérimentale, ils disposent d'un pèse-personne, et d'une canne métallique pour effectuer leurs mesures dans les diverses postures représentées sur l'illustration de l'item#2 (a, b, c et d). Les trois points de vue (I, II et III) constituant une situation de malentendu au sujet de la posture (c) sont schématisés par cinq élèves (Annette, Barbara, Germaine, Pierrette et Sylvie). Le choix des traces se fait évidemment à partir des interventions de ces élèves à divers moments, ce qui complexifie l'enquête puisque les élèves travaillent par groupe.

Le tableau 6.2, ci-dessous, présente la composition des groupes et la façon dont les trois points de vue se répartissent dans plusieurs groupes :

Point de vue :	I. $\pm reposer$	II. $\pm toucher$		III. $\pm coller$	
Élève	Germaine	Annette	Sylvie	Barbara	Pierrette
Groupe	avec Ilona, Urs	avec Ophélie	avec Barbara	avec Sylvie	avec Alain, Etienne

Demi-classe	B	A	A	A	B

TABLE 6.2 – Répartition dans les groupes des points de vue divergents à l'item #2, posture (c).

Pour décrire l'évolution, au fil de la séquence, des points de vue divergents que j'ai établis dans l'analyse de la situation de malentendu, j'effectue ci-dessous l'inventaire des moments de confrontation de ces points de vue avec d'autres points de vue d'élèves (moments #1-5), qu'ils soient conformes au modèle enseigné ou non. Germaine, Annette et Pierrette se retrouve chacune dans un groupe avec d'autres élèves, alors que Sylvie et Barbara se retrouve dans le même groupe, ce qui nous permet d'observer la confrontation de deux points de vue différents parmi ceux identifiés comme participant à la situation de malentendu : les points de vue 2 ($\pm toucher$) et 3 ($\pm coller$) sont mis en confrontation au cours du travail coopératif de Barbara et Sylvie. Cette situation particulièrement favorable à un conflit socio-cognitif conduit effectivement à une résolution de la situation de malentendu pour ces deux élèves, qui s'explicite dans une conversation en aparté avec l'enseignant qu'elles ont elles-mêmes initiée. Cette conversation avec l'enseignant est incluse dans les moments analysés pour notre enquête.

La liste ci-dessous présente les moments choisis pour l'enquête sur l'évolution de la situation de malentendu au fil de la séquence :

— pour le premier point de vue (I)

Moment #1 - la réponse écrite sur le graphe Digalo de Germaine, Ilona et Urs à la phase 3 de la séquence ;

Moment #2 - la conversation et la réponse écrite dans le rapport expérimental de Germaine, Ilona et Urs à la phase 4 de la séquence ;

— pour le deuxième point de vue (II)

Moment #3 - la réponse écrite sur le graphe Digalo de Annette et Ophélie à la phase 3 de la séquence ;

Moment #4 - la conversation et la réponse écrite dans le rapport expérimental de Annette et Ophélie à la phase 4 de la séquence ;

— pour le troisième point de vue (III)

Moment #5 - la réponse écrite sur le graphe Digalo de Alain, Etienne et Pierrette à la phase 3 de la séquence ;

Moment #6 - la conversation et la réponse écrite dans le rapport expérimental de Alain, Etienne et Pierrette à la phase 4 de la séquence ;

— pour la confrontation du deuxième et du troisième point de vue (II et III)

Moment #7 - un échange en aparté entre Barbara, Sylvie et l'enseignant, à la phase 3 de la séquence.

Si cette sélection présente le désavantage de ne pas offrir une analyse micro-génétique plus systématique, elle permet néanmoins de faire émerger les résultats les plus facilement accessibles à travers l'analyse détaillée de moments particulièrement importants quant à l'évolution de la situation de malentendu du point de vue des élèves, sans présenter une longue et fastidieuse étude de la question.

6.4.5.3 Moment #1 : la réponse écrite sur le graphe Digalo de Germaine, Ilona et Urs

Germaine se retrouve avec deux élèves qui fournissent chacun une schématisation conforme au modèle enseigné lors de pré-questionnaire. En outre, son point de vue consiste à faire reposer le plafond sur la canne, et conduit à une réponse identique au modèle enseigné pour la posture (c). La situation de malentendu n'implique que la justification fournie par Germaine. Comme le graphe Digalo de la demi-classe B au sujet de l'item #2 n'aborde pas la justification des réponses - seule les réponses elles-mêmes sont schématisées - les traces disponibles à la phase 3 de la séquence ne permettent pas d'avancer quant à l'évolution de la situation de malentendu pour ce point de vue. L'enregistrement vidéo permet seulement de remarquer que c'est surtout Urs qui est aux commandes de l'ordinateur pour poster des réponses sur Digalo, et qu'il n'y a pratiquement aucune conversation au sein du groupe portant sur les réponses à donner.

6.4.5.4 Moment #2 : conversation et réponse écrite dans le rapport expérimental de Germaine, Ilona et Urs

Le rapport expérimental, par contre, fournit une trace de la justification de la réponse pour la posture (c). Dans le rapport expérimental du groupe, nous lisons la réponse suivante :

Extrait du rapport expérimental de Germaine Ilona et Urs - item #2 - posture (c)

```
1 C est plus lourd car il y a un troisième poids, celui de la canne appuyée sur le plafond
```

Cette réponse est en faveur de la schématisation conforme au modèle enseigné, puisque le prédicat utilisé est désormais $\pm appuyer$ au lieu de $\pm reposer$. Autrement dit, c'est le point de vue de Ilona et Urs qui est représenté à l'écrit, et non celui de Germaine. Celle-ci n'a pas forcément pour autant changé d'avis : que se passe-t-il dans la conversation de ce groupe ? Malheureusement, l'enregistrement de cette conversation a été perdu pour des raisons techniques. Nous ne saurons donc pas ce qu'il est advenu du point de vue de Germaine au cours de la séquence.

6.4.5.5 Moment #3 : la réponse écrite sur le graphe Digalo de Annette et Ophélie

Annette se retrouve avec Ophélie, qui a fournit une schématisation conforme au modèle enseigné. Dans la conversation Digalo (voir Figure 6.20), ce groupe (groupe , coccinelle) ne poste qu'une seule intervention (n°27) : "Nous sommes tout à fait d'accord avec l'affirmation du grOupe 4 (facile, oui, Emilien) ! Votre perspicacité est exceptionnelle... bravO bravO ! champiOn !".

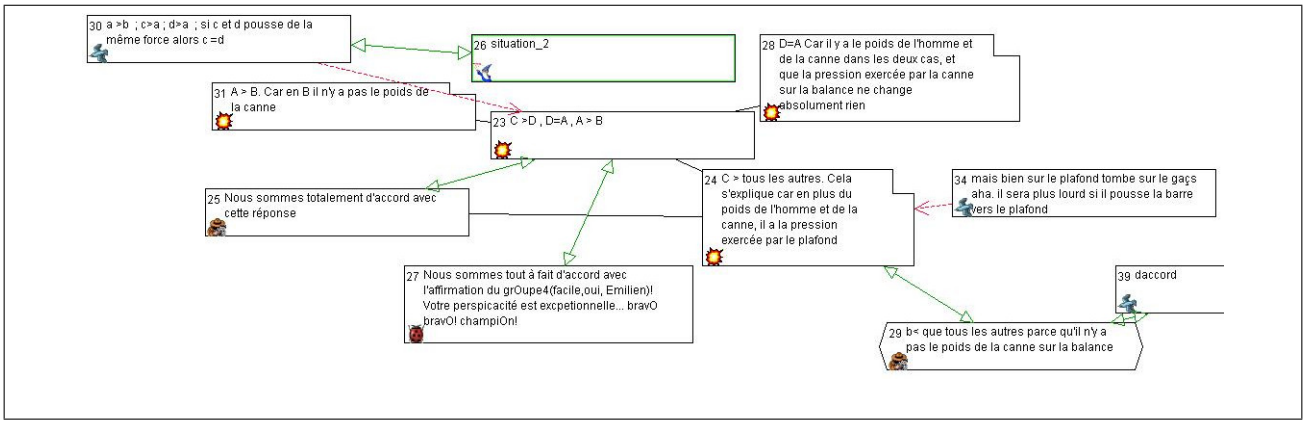


FIGURE 6.20 – Conversation Digalo de la demi-classe A sur l'item 2 du questionnaire.

Cette intervention est reliée à l'intervention n°23, qui est celle à laquelle fait référence "l'affirmation du grOupe 4", à savoir : "C>D, D=A, A>B". Nous avons vu que la spécificité de ce point de vue consiste à schématiser une égalité entre les indications du pèse-personnes en (a) et en (c). Or, dans cette intervention, il n'y a pas de comparaison directe de la posture (a) avec la posture (c). Annette a-t-elle remarqué que "l'affirmation du grOupe 4" contredit sa réponse au pré-questionnaire ?

La conversation enregistrée à l'audio ne nous fournit rien de plus quant à cette question : les filles y discutent principalement de ce qu'elles écrivent, notamment de l'orthographe de "perspicacité".

6.4.5.6 Moment #4 : conversation et réponse écrite dans le rapport expérimental de Annette et Ophélie

Lors de la séance expérimentale, Ophélie est absente. Annette se retrouve dans un groupe avec Victor et Ferdinand, qui ont tous les deux fourni une schématisation conforme au modèle enseigné lors du pré-questionnaire. Ferdinand est le seul élève à avoir changé de groupe à trois reprises au cours de la séquence : lors de la séance Digalo (phase 3 de la séquence), il était justement dans le groupe "4" au point de vue duquel Annette et Ophélie se sont ralliées. Victor était absent lors de la séance Digalo. Voici la réponse écrite produite par Annette, Ferdinand et Victor dans leur rapport expérimental au sujet de la posture (c) de l'item #2 :

Extrait du rapport expérimental de Annette Ferdinand et Victor - item #2 - posture (c)

```
1
2 Situation 3: debout sur le pèse-personne, la barre appuyant le plafond. Poids: ~81kg.
3 Il y a le poids du plafond qui est additionné.
```

Cette réponse comprend plusieurs déterminés. À la ligne 2 du verbatim, la schématisation spécifiant le type d'interaction entre le personnage, la canne et le plafond est en faveur de la schématisation conforme au modèle enseigné, puisque le prédicat utilisé est désormais $\pm appuyer$ au lieu de $\pm soulever\ la\ canne$ (voir l'opération $\eta_{II.9}$, p. 504). Autrement dit, c'est plutôt le point de vue de Ferdinand et/ou de Victor qui

est représenté ici, et non celui de Annette. Mais, comme Annette ne fournit pas de justification explicite pour son point de vue quant à la posture c du personnage, cette décision en faveur du point de vue des garçons du groupe n'apparaît pas aussi clairement que pour le groupe de Germaine au moment #2.

En outre, à la ligne 3 du verbatim du rapport expérimental (ci-dessus), la réponse du groupe va dans le sens d'une force exercée par le plafond, alors que Annette schématise un toucher sans pression, selon notre analyse antérieure. La justification "Il y a le poids du plafond qui est additionné." vient soutenir une réponse qui donne une indication supérieure sur le pèse-personne (" 81kg"), en raison du "poids du plafond". Cette schématisation ferait presque penser au point de vue de Germaine, pour qui le plafond "repose" sur la canne du personnage, mais c'est peut-être aussi l'expression maladroite d'une force de rétroaction du plafond sur la canne, de sens et d'intensité identique à la force exercée par le personnage sur le plafond à travers la canne, et de direction opposée, comme le stipule la troisième loi de Newton (que j'ai appelé la *loi de la force opposée*, voir p. 381). Ces élèves confondent néanmoins cette force de rétroaction avec le *poids*, dans leur schématisation écrite, ce qui n'est pas anodin et rapproche leur point de vue de celui de Germaine, pour l'occasion.

Nous ne pouvons pas conclure de ces traces que Annette a changé d'avis. Il semblerait plutôt que le groupe produit une réponse *grosso modo* conforme à la réponse escomptée, sinon que la justification confond une force exercée par le plafond par la *loi de la force opposée* avec le *poids* du plafond. La conversation orale entre les élèves ne nous apprend rien de plus : le sujet n'est pas explicitement discuté. C'est un indice supplémentaire en faveur de l'hypothèse d'une absence de confrontation des points de vue des élèves entre eux dans ce groupe, malgré l'activité centrée sur l'argumentation entre élèves.

6.4.5.7 Moment #5 : la réponse écrite sur le graphe Digalo de Alain, Etienne et Pierrette

Pierrette se retrouve avec Alain et Etienne, qui ont tous les deux fourni une schématisation conforme au modèle enseigné pour la posture (c), lors de la passation du pré-questionnaire. Alain a fournit une schématisation classée dans les réponses erronées anticipées par l'enseignant pour la posture (d). Lorsque le groupe travaille à l'item #02 ensemble, il produit plusieurs réponses sur le graphe Digalo (groupe 💥, explosion). Comme ces réponses sont imbriquées au cours de la conversation écrite, l'ensemble du graphe d'argumentation construite par la demi-classe B est représentée ci-dessous, dans la figure 6.21.

Alain, Etienne et Pierrette produisent les interventions n°54, n°57, n°61 et n°62 du groupe 💥 (explosion). La première intervention (n°54) s'oppose à l'intervention n°39 du groupe 🐦 (oiseau) précisément au sujet de la posture (c) : "54 on est d'accord ! Sauf pour c)". Or, le groupe (oiseau) propose justement la réponse conforme au modèle enseigné. Cela indique peut-être une prolongation de la situation de malentendu, qui se résorbe ensuite au moment où le groupe change explicitement d'avis, par son intervention n°57 : "En fait on est d'accord pour c)". Selon toute vraisemblance, nous avons ici une résolution de la situation de malentendu à l'occasion de l'activité argumentative médiatisée par Digalo sur la posture (c). Deux remarques s'imposent néanmoins :

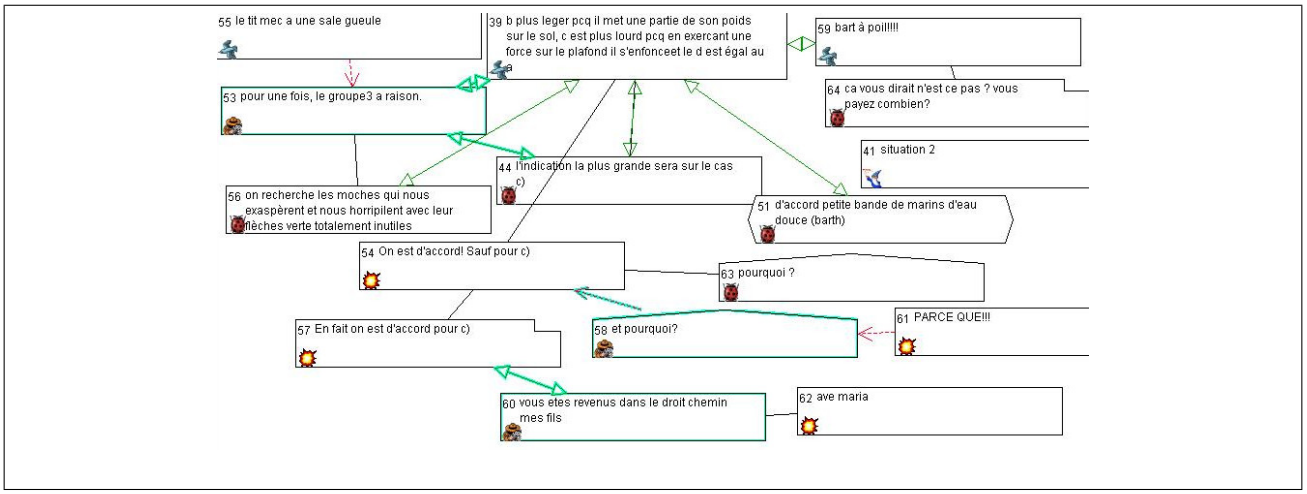


FIGURE 6.21 – Conversation Digalo de la demi-classe B sur l'item 2 du questionnaire.

— le fait que le groupe modifie sa schématisation au cours de l'activité indique peut-être une discussion au sein du groupe durant laquelle les points de vue divergents sont confrontés ;

— si l'activité de confrontation de points de vue a effectivement eu lieu, et est résolue à l'échelle du groupe en faveur du modèle enseigné, mais cela n'implique pas forcément que Pierrette a individuellement adhéré à cette schématisation.

Ces deux remarques nous invitent à examiner si d'autres indices peuvent préciser l'éventuel processus de résolution de la situation de malentendu pour Pierrette.

Malheureusement, l'enregistrement audio de la conversation au sein du groupe n'amène aucune trace intéressante. Pendant l'activité sur Digalo, le groupe n'échange pratiquement rien oralement, et se concentre sur la lecture et les réponses aux interventions sur le graphe Digalo. L'hypothèse d'une discussion au sein du groupe ne peut pas être validée. Il semble que c'est plutôt la lecture du graphe d'argumentation Digalo qui a permis au groupe de changer de point de vue.

6.4.5.8 Moment #6 : conversation et réponse écrite dans le rapport expérimental de Alain, Etienne et Pierrette

La réponse écrite au rapport expérimental du groupe est conforme au modèle enseigné, et clairement formulée :

Extrait du rapport expérimental de Alain Etienne et Pierrette - item #2 - posture (c)

```
a) debout sur la balance avec la canne à la main m=77kg
b) debout sur la balance avec la canne appuyant sur le sol m=74.3kg
c) debout sur la balance avec la canne appuyant sur le plafond m=79.9kg
d) debout sur la balance avec la canne appuyant sur la balance m=77.2kg
P1: poids personne P2: poids canne P': poids exercé par le plafond
a) P1+P2
b) P1 différence=poids de la canne
```

```
c) P1+P2+P'
d) P1+P2
```

Les enregistrements audio de l'activité de ce groupe sur l'item #2 étant manquant, aucune trace n'est disponible de leur conversation lors de l'activité expérimentale. La justification de la réponse dans le rapport expérimental (ci-dessus) est donc la seule trace à disposition du raisonnement des élèves. Or, si la réponse comparant la posture (a) à la posture (c) est conforme au modèle enseigné, la définition de P' évoque le point de vue de Germaine ou l'utilisation d'une classe-objet indifférenciée {poids, force}.

En bref, si nous pouvons considérer que le groupe dans lequel Pierrette travaille a changé sa réponse du fait des échanges avec les autres groupes sur Digalo, les traces sont insuffisantes pour émettre une hypothèse quant la schématisation à laquelle Pierrette elle-même a effectivement abouti en fin de séquence quant à la posture (c). Les traces à disposition ne permettent pas non plus de considérer la situation de malentendu résolue du point de vue de Pierrette.

6.4.5.9 Moment #7 : aparté entre Barbara, Sylvie et l'enseignant

Barbara, pour qui la canne est "collée" au plafond et retient le personnage, et Sylvie, pour qui elle "touche" le plafond sans que le personnage n'appuie, se retrouvent par hasard dans le même groupe. Elles sont toutes les deux concernées par la situation de malentendu, mais de manière différente. Rappelons néanmoins que Sylvie schématise également la réponse conforme au modèle enseigné dans une note à la suite de sa réponse (voir la réponse de Sylvie à l'item #2 du pré-questionnaire, p. 501). Les traces à disposition permettent cette fois d'identifier précisément le processus de résolution de la situation de malentendu, pour les deux points de vue des élèves impliquées.

Au début de leur travail sur l'item #2, ces deux élèves dialoguent très peu sur la physique. Barbara semble attendre que Sylvie trouve la solution. Sylvie est au commande de l'ordinateur et rédige une réponse. Barbara fait une proposition de correction de l'orthographe : "il y a s à force". Puis, les deux élèves remarquent qu'elles ne peuvent pas poster leur réponse, car elles sont déconnectées du graphe d'argumentation commun à la classe. Sylvie initie alors un échange avec Barbara en regardant la consigne sous format papier, partant d'une conditionnelle examinant les deux interprétations qu'elle a utilisée lors du pré-questionnaire, à savoir celle d'une canne qui "touche" le plafond, et celle d'une canne qui y est "fortement appuyée" :

Transcription 3. Phase 3 - Discussion sur l'item #2 - Groupe de Barbara et Sylvie - 16 janvier - 51' à 52'

Enregistrement vidéo

```
Sylvie:   ah c'est là (.) alors si (.) il pousse (.) ce sera égal (..)
Barbara:  égal à?
Sylvie:   s'il (.) s'il pousse pas la barre (..)
Barbara:  ((rires))
Sylvie:   alors si il pousse pas (.) ce sera égal à ça [désigne la posture (a)] (.) si il
```

```
6           pousse (. ) si il pousse
7   Barbara:  si il pousse (..) j'y comprends rien
```

Elles se mettent d'accord sur le premier cas de figure envisagé par Sylvie, où la canne est simplement en contact, "touche" le plafond sans exercer de poussée, mais ne parviennent pas à une réponse pour le cas où il y a une poussée exercée. L'interprétation de Barbara au pré-questionnaire n'est pas explicitement abordée. Suite au bref échange reporté ci-dessus, les élèves appellent le chercheur et l'enseignant pour régler le problème technique : elles se sont rendu compte que leur connexion était perdue. Avec l'aide de l'enseignant, elles se reconnectent, avec succès cette fois.

Plutôt que de débattre entre elles, Barbara et Sylvie profitent alors de la présence de l'enseignant pour poser leur question au sujet de la consigne. Voici l'échange qui s'ensuit :

Transcription 4. Phase 3 - Discussion sur l'item #2 - Groupe de Barbara et Sylvie - 16 janvier - 55' à 56'

Enregistrement vidéo

```
1   Sylvie:   mais Monsieur? j'ai juste une question (.) là ((désigne la posture c)) est-ce là
2             (.) il pousse vers le haut? (.) la barre? (.) et là est-ce qu'il la pousse vers
3             le bas (.) comme ça  ((mouvement de haut en bas avec la main )) ? (.) est-ce
4             qu'il la pousse ou il l'a seulement dans les mains comme ça ?
5   E:        il l'a seulement dans (.) dans les mains (.) l'autre là ((indique la posture
6             c)) il la pousse ((fait le geste de pousser vers le haut contre le plafonds))
7             (.) et l'autre il l'a mis ((fait le geste de mettre la canne au sol avec les
8             deux mains posées dessus)) (.) comme ça
9   Sylvie:   mais il appuie pas dessus ?
10  E:        il appuie
11  Sylvie:   il appuie?
12  E:        mm
13  Sylvie:   d'accord (.) alors s'il appuie c'est totalement faux
14  Barbara:  ooooh
15            ((l'enseignant quitte le groupe))
16            ((s écrit leur réponse Digalo sous la dictée de b inaudible))
```

Il n'est pas évident que cet échange permette effectivement à l'enseignant de se rendre compte qu'il y a diverses manières d'interpréter la consigne. La question de Sylvie, d'abord générale, devient plus spécifique au cours de l'échange et finit par porter très précisément sur les prédicats dont nous avions identifié la divergence dans notre analyse de la situation de malentendu (voir table 6.2, p. 515) : $\pm appuyer$ et $\pm pousser$ ne sont pas considérés comme interchangeables pour Sylvie, alors que l'enseignant ne semble pas prêter beaucoup d'attention à l'usage de l'un ou de l'autre, les considérant peut-être plutôt comme des synonymes.

Après cet échange avec l'enseignant et s'être finalement connectées au graphe Digalo de la classe, Barbara et Sylvie découvrent un graphe Digalo où se trouvent déjà plusieurs interventions des autres groupes, en particulier l'intervention n°23 ("C>D, D=A, A>B") à laquelle elles vont se référer. Barbara

et Sylvie (groupe 🐦, oiseau, sur le graphe reproduit à la figure 6.20, p. 517) écrivent l'intervention n°30 sur Digalo, qui montre qu'elles ont désormais adapté leur interprétation en faveur d'une poussée contre le plafond :

Intervention 30 sur Digalo - item #2 - Groupe Barbara Sylvie - 16.01.2007

```
1  a>b; c>a; d>a; si c et d pousse de la même force alors c=d
```

Cette intervention est liée à l'intervention n°23 avec un lien traitillé, signifiant une opposition. Du point de vue du contenu, les interventions n°23 et n°30 divergent uniquement quant à la posture (d). Sur la forme, par contre, la posture (c) n'est pas explicitement comparée à la posture (a) dans l'intervention n°23, alors que Barbara et Sylvie fournissent une comparaison explicite - et conforme au modèle enseigné - des postures (a) et (c).

Barbara et Sylvie postent encore deux interventions sur le graphe Digalo, l'intervention n°34, où elles reviennent sur une divergence d'interprétation de la posture (c) pour s'en moquer, et l'intervention n°39 où elles se contentent de signaler leur accord avec l'intervention n°29 au sujet de la posture (b). L'intervention n°34 mérite une analyse pour examiner la manière dont le groupe schématise désormais son interprétation de la posture (c) :

Intervention 34 sur Digalo - item #2 - Groupe Barbara Sylvie - 16.01.2007

```
1  mais bien sur le plafond tombe sur le gars aha.
2  Il sera plus lourd s'il pousse la barre vers le plafond
```

À la ligne 2 du verbatim, les élèves donnent leur réponse. À la ligne 1 du verbatim, elles se moquent de la justification amenée par un autre groupe dans l'intervention n°24 : "C> tous les autres. Cela s'explique car en plus du poids de l'homme et de la canne, il a la pression exercée par le plafond ".

Pourtant, la réponse de Barbara et Sylvie donne également l'indication du pèse-personne supérieure en (c) par rapport à (a). Ceci nous invite à penser que leur opposition n'est pas au sujet de l'évaluation de la valeur de l'indication du pèse-personne, la réponse à la question, mais au sujet de la justification apportée par leurs camarades, c'est-à-dire le déterminé ($-$, que y avoir la pression exercée par le plafond). En effet, Barbara et Sylvie fournissent une autre justification (la ligne 2 du verbatim ci-dessus), que nous pouvons considérer dans cet échange comme une détermination alternative à la justification critiquée. En logique naturelle, nous pouvons décrire l'intervention de Barbara et Sylvie par une opération d'organisation raisonnée articulée à la détermination de l'autre groupe visant à la tourner en dérision ($\tau \xrightarrow{mais\ bien\ sûr}$), et une détermination qui constitue leur réponse :

τ_1 : ... $\Rightarrow$ ($-$, que y avoir la pression exercée par le plafond) $\xrightarrow{mais\ bien\ sûr}$ ($-$, que le plafond tomber sur le gars)

δ_2 : ... $\Rightarrow$ ($-$, que [le gars] pousser la barre vers le plafond).

Cette opération logico-discursive δ_2 participe à la situation de malentendu analysée, à la différence qu'il ne s'agit plus d'opérations logico-discursives effectuées lors de l'interprétation du schéma illustratif de l'item

#2 comme auparavant [478], mais d'une opération effectuée lors de l'interprétation de la schématisation d'un groupe de pairs.

Cet exemple illustre l'importance pour les élèves engagés dans un processus de construction de connaissance de ce que enseignants et chercheurs pourraient ne considérer qu'une "question de formulation", et ce que nous nous sommes donné comme objet d'étude avec le concept d'opération logico-discursive. Le processus d'interaction entre ces deux groupes d'élèves [479] met en évidence l'importance, *de leur point de vue*, de la manière dont les connaissances sont mises en discours. Alors que ces deux groupes sont d'accord sur le fond (ils donnent la même réponse et considèrent, à ce moment-là de leur schématisation, que le plafond exerce effectivement une force sur la canne), ils ne se comprennent pas, et l'un corrige l'autre en reformulant un déterminé énoncé par leurs pairs pour s'en moquer.

6.4.5.10 Synthèse de l'évolution de la situation de malentendu

Pour les élèves ayant exprimé individuellement des points de vue divergents, c'est presque toujours la prise d'initiative d'un autre membre du groupe qui fait disparaître les points de vue divergents. Les traces disponibles concernant le point de vue de Germaine semblent montrer qu'elle a joué un rôle mineur dans la production des réponses écrites du groupe, le seul garçon du groupe ayant pris les commandes. Le point de vue de Pierrette semble, à partir des traces à disposition, disparaître dans le travail qu'exécutent Alain et Étienne. Il en va de même pour Barbara, dont je ne retrouve pas dans ses échanges avec Sylvie, le point de vue qu'elle a schématisé lors de la passation du pré-questionnaire. Son rire gêné et son expression "j'y comprends rien" fournissent également des indices qu'elle est si peu sûre de sa réponse, qu'elle ne la confronte même pas à sa camarade. C'est dès lors Sylvie, qui avait déjà anticipé la possibilité d'interpréter le schéma de plusieurs manières possibles, qui résout la situation de malentendu pour le groupe, en posant la question à l'enseignant. Sylvie est la seule élève concernée par la situation de malentendu a l'avoir résolue. Cependant, lors de la passation du pré-questionnaire, elle avait déjà anticipé deux interprétations possibles de la consigne, toute seule, ce qui signifie qu'elle entrevoyait peut-être les risque de malentendu déjà à ce moment-là.

Si la consigne est finalement clarifiée au fil de la séquence, les traces analysées ne permettent pas toujours de décider de l'évolution des points de vue individuels au fil de la séquence. Sylvie a certainement compris, lors de l'échange avec l'enseignant, quelle interprétation celui-ci a fait du schéma de la consigne. Barbara a assisté à ce dialogue et, à ce titre, a toutes les ressources pour penser que sa première interprétation - la canne collée au plafond - n'est pas celle de l'enseignant. Néanmoins, nous ne disposons d'aucune

478. Toujours selon notre hypothèse, s'entend.

479. Il n'est peut-être pas inutile de rappeler ici que nous souhaitions, dans un premier temps, analyser ce processus d'interaction en tant qu'argumentation entre pairs : hors, la démarche adoptée pour analyser des situations de malentendu nous a conduit à mettre en évidence l'imbrication du langagier et du cognitif qui intéresse les sciences de l'éducation dans la pratique de l'argumentation, par les opérations logico-discursives de la logique naturelle. L'analyse à l'aide de ce cadre théorique permet de soutenir la thèse que tout au long de la construction de leur connaissance, l'apprenant est tributaire à la fois du contenu cognitif et de la formulation ou communication, et que cette formulation ou communication n'est justement pas simplement communication ou formulation, elle constitue et est constituée d'opérations cognitives dans et par le langage, opérations permettant non seulement de se comprendre mais aussi d'apprendre.

schématisation de sa part, et encore moins de la part de Germaine et Pierrette, qui permette d'établir un changement de points de vue de ces élèves : malgré le dispositif d'enseignement fortement orienté vers les échanges entre pairs et la prise de parole des élèves, celles-ci ne s'expriment plus individuellement sur la question.

6.4.6 Discussion

6.4.6.1 Commentaire #1 : origine de la tâche et adaptation à la séquence

Introduction

L'analyse de cette situation de malentendu a permis de rétablir la cohérence de cinq réponses sur les 13 réponses à l'item #2 qui paraissaient non conformes au modèle enseigné lors du pré-questionnaire (13/69[480]). Ces réponses retrouvent une cohérence - voire un raisonnement conforme au modèle enseigné - si les divergences dans l'interprétation de la consigne sont prises en considération.

Cette synthèse inspire deux remarques. Premièrement, le défi que pose cette question aux élèves lors de la passation du pré-questionnaire est relativement faible, quand bien même les élèves répondent avant de commencer les cours de mécanique. Deuxièmement, une bonne partie des difficultés présumées des élèves (5/13) ont trait à l'interprétation de la consigne plutôt qu'à la physique. À partir de ces constats, je me suis dès lors posé la question de l'origine de cette tâche, et j'ai trouvé parmi les livres de référence de l'enseignant[481] la situation-problème de Lemeignan et Weil-Barais (1993), qui a inspiré l'item #2. Je propose dans ce commentaire une analyse des divergences dans la schématisation des tâches en comparant l'item #2 à l'exercice original de l'ouvrage, de manière à proposer l'hypothèse d'une situation de malentendu en amont même de celle qui a été analysée, et qui y participe micro-génétiquement puisqu'elle prépare la dévolution de l'item #2 aux élèves.

Avant de commencer, il convient de faire une remarque importante : cette analyse n'a aucune valeur évaluative du travail de l'enseignant, et encore moins de l'ouvrage qui a inspiré l'item #2. Autant les situations de malentendu étudiées impliquant les élèves sont des accidents de la communication tout à fait normaux et ordinaires, dont je fais usage ici dans le but d'étudier ce qui échappe aux observations lorsque "tout se passe bien", c'est-à-dire comme des *incidents critiques*, autant la situation de malentendu analysée dans ce commentaire et qui implique l'enseignant et un ouvrage rédigé par des chercheurs à l'intention des enseignants, a également le statut d'*incident critique* et ne permet de présumer ni de la qualité du travail de l'enseignant, ni de celle des auteurs de l'ouvrage, puisqu'il s'agit uniquement d'un *incident critique* particulier. Autrement dit, comme le reste de cette recherche, cette analyse n'a aucune prétention de généralisation. Par contre, elle permet de mettre en évidence un problème particulier, d'un

480. Le total de 69 réponses correspond au fait que pour chaque élève a produit trois réponses, une pour chacune des comparaisons des postures (b), (c) et (d) à la posture (a).
481. J'en profite pour remercier l'enseignant de m'avoir mis à disposition ces ouvrages, et tout particulièrement pour avoir accepté de partager ses sources lors de cette recherche, ce qui me permet ici de proposer une analyse à partir d'un type de données auquel les chercheurs ont rarement accès.

genre spécifique, auquel se confronte la pratique de l'enseignant - et des auteurs d'ouvrages à leur intention - et qui, en tant que tel, permet éventuellement de susciter des réflexions sur l'usage de la littérature pour construire des séquences ou sur la rédaction de manuels. Mais, surtout, cette analyse permet d'*illustrer le niveau de détail auquel il s'agit d'être attentif lorsque l'on souhaite transmettre une tâche cognitive bien spécifique à des élèves, ou à des enseignants*.

Présentation de la tâche originale

Dans l'ouvrage de Lemeignan et Weil-Barais (1993), le consigne proposée est la suivante :

> *une personne monte sur le pèse-personne, un bâton à la main,a. avec le bâton, elle appuie sur le pèse-personne,b. avec le bâton, elle appuie sur le sol,c. avec le bâton, elle appuie au plafond,d. elle reste immobile sur le pèse-personne.*
>
> *(Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p. 112)*

La mise en scène didactique proposée consiste à faire les manipulations devant les élèves en cachant le cadrant du pèse-personne. La solution à cette situation-problème se base sur une approche de la mécanique centrée sur les concepts de *système*, d'*action* et d'*interaction*. Cette approche dénommée *le modèle des interactions* a été élaborée par Tiberghien et Weil-Barais (1987). Un schéma présente la réponse attendue dans le cadre du modèle des interactions, reproduit ci-dessous par la figure 6.22.

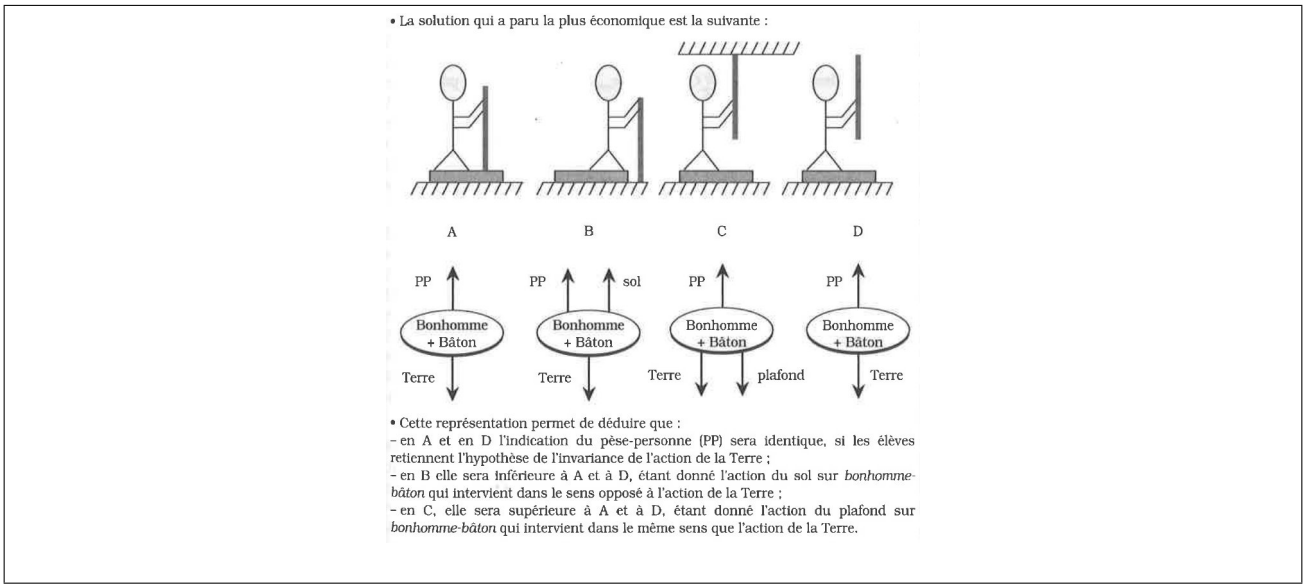


FIGURE 6.22 – Solution proposée par Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p. 113.

La solution présentée dans l'ouvrage consiste à considérer le personnage et sa canne *ensemble*, dans un système dénommé "bonhomme + bâton", et d'examiner les interactions de cet ensemble avec le sol (la force de soutien du sol), avec la Terre (la force de gravité) et avec le pèse-personne (la force de soutien du pèse-personne, notée PP). Dans cette modélisation, la valeur de la force de soutien du pèse-personne (PP) correspond au poids mesuré sur le pèse-personne, et permet de répondre à la question posée dans la

consigne. Examinons le raisonnement proposé pour chacune des postures du personnage présentées dans l'ouvrage, auxquelles je fais référence avec des lettres majuscules pour les distinguer des postures définies par l'enseignant dans son item du questionnaire (a), (b), (c) et (d).

Dans les postures (A) et (D), les schémas des interactions représentent deux forces exercées sur le système "bonhomme + bâton" (Lemeignan & Weil-Barais, 1993) (voir figure 6.22) : "l'action de la Terre" est représentée par une flèche dirigée vers le bas, et la réaction est représentée par une flèche de sens opposé, qui correspond à la force de soutien du pèse-personne, c'est-à-dire à la mesure du $poids$ indiquée sur le pèse-personne.

Dans la posture (B), le schéma de la solution contient les deux forces indiquées pour les postures (A) et (D) et une troisième : la force de soutien exercée par le sol sur le système "bonhomme + bâton", représentée par une flèche dirigée vers le haut. Cette troisième force permet d'établir que l'indication du pèse-personne (la valeur scalaire de PP) sera plus petite en (B) qu'en (A) ou en (D), car à l'action de la Terre, considérée identique pour toutes les postures, correspond deux forces de réaction au lieu d'une seule. Néanmoins, ce raisonnement n'est valable que si l'on considère que le bonhomme appuie effectivement sur le sol par l'intermédiaire de la canne, c'est-à-dire si la force de soutien exercée par le sol sur le système "bonhomme + bâton" n'est pas nulle. Autrement dit, la possibilité d'une réponse apparemment erronée en raison d'une interprétation des schémas n'est pas exclue.

Dans la posture (C), le schéma de la solution proposée contient les deux forces indiquées pour les postures (A) et (D) et une troisième, différente de celle de la posture (B). Il s'agit de la force exercée par le plafond, en réaction à l'appui du système "bonhomme + bâton". Comme l'action de la Terre est toujours la même que pour les autres postures, la valeur scalaire de PP sera plus grande qu'en (A), la somme des forces étant nulle (le système n'accélère pas). Au résultat, PP a pour valeur dans cette posture la somme de l'action de la Terre et de la force exercée par le plafond. Comme pour (B), ce raisonnement n'est valable que si l'on admet que le bonhomme exerce effectivement une pression sur le plafond par l'intermédiaire de la canne, autrement dit seulement si la force exercée par le plafond sur le système "bonhomme + bâton" n'est pas nulle.

Dans la solution de cette situation-problème donnée par Lemeignan et Weil-Barais (1993), il est attendu des élèves qu'ils raisonnent en physicien lors de l'analyse du système de manière à prendre la décision de considérer personnage et canne comme un ensemble en interaction. Or, Lemeignan et Weil-Barais (1993) signale que la difficulté pour les élèves consiste justement à regrouper les objets (p. 114) ou, autrement dit, à procéder au découpage de la situation-problème de manière à examiner les interactions pertinentes. Nous pouvons donc nous attendre à ce que les élèves examinent l'interaction entre le personnage et la canne, entre le personnage et le pèse-personne, entre la canne et le plafond, etc. *de proche en proche*[482] plutôt que de mettre en œuvre une modélisation qui regroupe d'emblée le personnage et la canne de manière à examiner les interactions de ce groupe avec le pèse-personne, le sol et le plafond.

482. Selon l'expression de Piaget et les descriptions qu'il en fait, à l'occasion des recherches sur les opérations concrètes.

C'est effectivement ce que nous observons dans la situation de malentendu analysée : du fait de l'application par certains élèves d'une procédure d'analyse *de proche en proche* des actions du personnage et de la canne, des divergences apparaissent au niveau des significations de la consigne donnée par l'enseignant. Pourtant, pour résoudre la tâche, ces diverses interprétations possibles des interactions entre le personnage et la canne conduisent le plus souvent à fournir la même réponse malgré des justifications divergentes. En revanche, prendre la décision de traiter le personnage et la canne comme un ensemble permet de s'économiser un long raisonnement et de résoudre la situation-problème plus simplement et plus rapidement. Ainsi, l'enjeu de la situation-problème présentée dans l'ouvrage ne se situe pas tant au niveau d'une réponse conforme à la solution fournie, mais plutôt au niveau de l'adoption d'une modélisation adéquate et efficace. L'objectif d'apprentissage n'est donc pas le même que celui que l'enseignant a construit à partir de la réflexion de Bachelard (et d'autres sources) sur les préconceptions des élèves constitutifs d'obstacles à l'apprentissage.

Adaptation de la tâche : similitudes et différences

L'enseignant construit à partir de l'exercice de l'ouvrage un item papier-crayon pour le pré-questionnaire, qui n'est accompagné d'aucune mise en scène didactique comme c'est prévu dans l'ouvrage. Plus tard dans la séquence, lorsque cette situation-problème est utilisée pour l'activité Digalo, ce même item est à nouveau présenté tel quel devant les élèves sans plus d'explication. La mise en scène proposée par Lemeignan et Weil-Barais (1993) est reprise pour la dernière activité, à la phase 4 de la séquence, mais sous la forme d'un dispositif expérimental que l'enseignant fournit aux élèves : c'est à eux de prendre la canne et de monter sur le pèse-personne.

L'enseignant a redessiné le schéma de l'ouvrage et réécrit les explications verbales des quatre postures. Le schéma utilisé par l'enseignant (figure 6.18) est plus proche d'un dessin de bande-dessinée que le schéma de l'ouvrage de référence (figure 6.22), et présente l'avantage de disposer de légendes explicites pour le pèse-personne, la canne, le plafond et le sol. En outre, le schéma de l'enseignant représente l'effort du personnage par des lignes pointillés rouges et quelques étoiles. Cet effort n'a cependant pas le même sens dans chacune des quatre dispositions (a), (b), (c) et (d). Pour en dégager les différents sens, il faut analyser la force exercée par le personnage sur la canne et vice-versa. Par exemple, dans la disposition du personnage et de la canne (d), l'effort de celui-ci sur la canne apparaît superflu si le but du schéma est de présenter le personnage comme retenant la canne pour l'empêcher de tomber. Seule une force exercée horizontalement par le personnage sur la canne serait nécessaire dans ce cas, et cela ne demande pas beaucoup d'effort. Cependant, ce schéma peut aussi s'interpréter - justement du fait de l'effort du personnage dessiné - comme une action du personnage sur la canne, soit vers le haut, soit vers le bas. Si le personnage exerce une force sur la canne vers le haut, il la retient soit en partie soit complètement comme en (a), tandis que si le personnage exerce une force sur la canne vers le bas, il appuie sur le pèse-personne. Quoiqu'il en soit, l'indication sur le pèse-personne pour (d) est identique à (a), selon la réponse escomptée. Dès lors, pourquoi représenter cet effort sur l'illustration ?

La représentation de l'effort du personnage sur les schémas incite peut-être les élèves à se concentrer sur les interactions entre la canne et le personnage, alors que dans l'exercice original la modélisation à laquelle ils sont invités pour réussir la situation-problème consiste justement à les réunir dans un système "bonhomme + bâton".

Dans la consigne de l'item #2, les postures (A) et (D) de l'original sont inversées, de telle sorte que (A) correspond à (d) dans le schéma de l'enseignant, et (D) à (a). En conséquence, la question posée aux élèves n'est plus la même, puisque la posture de référence (a), à laquelle il s'agit de comparer toutes les autres, est désormais celle où le personnage porte le bâton (ou la canne) sans qu'il touche le pèse-personne, au lieu de (A) où le personnage appuie sur le pèse-personne avec la canne. Cette inversion rend plus difficile l'identification de la difficulté schématisée par l'enseignant, au sujet de la transmission des forces, puisque dans sa version l'erreur correspondante serait déjà concernée par la posture (a) à laquelle les autres sont comparées, et qui ne fait pas l'objet d'une question explicite dans la consigne de l'enseignant. Ceci nous a fait renoncer à en faire une analyse systématique, les élèves n'ayant pas systématiquement analysé la posture (a) explicitement dans leurs réponses.

Nous avons vu que la possibilité d'une interprétation divergente des schémas pour les postures (B) et (C) ne sont pas non plus exclues à partir des schémas de l'ouvrage. Cependant, et c'est un détail d'importance, ces schémas sont proposés en tant que solution du problème, et non comme consigne. La consigne est uniquement discursive, et oblige, en ce sens, à prendre connaissance de la situation à partir du prédicat $\pm appuyer$. Ainsi, les divergences entre les points de vue I, II, III et celui de l'enseignant, que nous avons mis en évidence lors de l'analyse de la situation de malentendu, ne seraient probablement pas apparues dans une utilisation de la tâche telle qu'elle est présentée dans l'ouvrage.

En outre, je propose de considérer l'hypothèse d'une situation de malentendu entre l'enseignant et l'ouvrage portant précisément sur le fait d'utiliser les schémas comme support visuel à une solution (point de vue de l'ouvrage), plutôt que comme consigne (point de vue de l'enseignant). Ce ne sont donc pas les modifications apportées aux détails graphiques ou illustratifs des schémas par l'enseignant qui constituent l'incident critique lors de l'adaptation de cette tâche, mais l'usage didactique qui est fait du schéma (corrigé versus consigne). En effet, ce qui donne lieu à des interprétations divergentes au moment de la consigne ne pose pas forcément problème au moment du corrigé de l'exercice, du moment que les élèves portent leur regard sur les schémas en sachant déjà que la personne "appuie sur le pèse-personne" en (A), "appuie sur le sol" en (B), "appuie au plafond" en (C) et "reste immobile sur le pèse-personne" en (D).

Implications pour la tâche des élèves

En synthèse, les adaptations effectuées par l'enseignant transforme la tâche de la manière suivante :

— l'approche didactique des auteurs, par analyse d'un système d'interaction, n'est pas du tout reprise ;

— les objectifs se déplacent : au lieu d'être l'usage d'une modélisation ou, *a minima*, d'une procédure de résolution (analyse d'un système d'interactions) comme dans l'ouvrage, c'est la comparaison correcte entre les postures qui sanctionne la réussite des élèves du point de vue de l'enseignant ;

— la posture de référence n'est plus (A) mais (D) ;

— le schéma illustrant la consigne de l'item #2 attire plutôt l'attention sur les rapports entre le personnage et la canne, *a contrario* de la réunion des deux éléments en un seul "système" ;

— le schéma illustratif est utilisé comme une consigne plutôt que comme support à la communication d'une réponse correcte aux élèves.

Dans la version de l'ouvrage, la tâche originale nous permettrait de considérer que si les élèves se posent le problème des deux alternatives, c'est qu'ils ne procèdent pas d'emblée comme le physicien en prenant la décision de considérer le personnage et la canne comme un tout. Autrement dit, les élèves concernés par la situation de malentendu seraient considérés comme n'ayant pas adoptés la démarche de modélisation enseignée, à savoir la modélisation d'un système d'interactions qui réunit le personnage et la canne en un seul ensemble.

Or, l'analyse de la situation de malentendu quant à l'interprétation de la consigne nous informe sur la manière de procéder des élèves : ils cherchent à interpréter les interactions entre le personnage et la canne, et en particulier pour la posture (c), entre la canne et le plafond. Peut-être que la représentation symbolique de l'effort sur le dessin attire leur attention sur l'interaction entre le personnage et la canne, peut-être qu'ils s'y intéresseraient de toute façon. Après tout, c'est sans doute une stratégie pertinente d'un point de vue d'apprenant : même en sachant que l'on pourrait traiter le personnage et la canne comme un ensemble, à défaut de l'expérience qui nous permet de compter sur la validité de la démarche, il vaut mieux vérifier en procédant *de proche en proche*.

Dans la version utilisée par l'enseignant, la tâche n'est pas la même. En effet, la procédure qui consiste à comparer directement (a) aux postures suivantes, une à une, en cherchant si dans (b), par exemple, il y a "plus" ou "moins" de forces qui s'exercent sur le pèse-personne semble acceptée comme une manière correcte de faire. Il est probable - et nous nous basons sur notre connaissance de la culture du lieu pour faire ce commentaire - qu'elle est jugée moins sûre qu'une procédure basée sur l'usage de valeur numérique et d'un calcul, que certains élèves ont utilisée lors de la phase 4 de la séquence, quand ils travaillent aux postes expérimentaux. Par contre, aucune modélisation en système d'interactions n'est explicitement demandée aux élèves, ni même effectuée par l'enseignant. Seuls les schémas sont rapidement esquissés au tableau noir (voir figure 6.19, p. 498), mais sans prise de décision explicite quant à la construction du modèle [483].

Du point de vue de l'enseignant, il y a subordination du raisonnement à la question : on n'en fait pas plus, au niveau modélisation et raisonnement, que ce qui permet de répondre. C'est un mode expert, qui peut néanmoins paraître très insatisfaisant pour l'apprenant qui aimerait explorer le modèle dans toutes

483. Une prise de décision explicite quant à la modélisation des postures nécessiterait d'adresser des questions et évaluer les alternatives, par exemple : quel système définir ? A quoi correspond l'indication sur le pèse-personne ?

sortes de cas de figure, pas seulement dans le cas très spécifique de la question posée. Autrement dit, l'apprenant a aussi ses propres questions... Chez l'élève, il y a subordination de la question au (problème que pose l'acquisition du) modèle de Newton : l'objectif est d'abord d'apprendre le modèle, on peut éventuellement l'utiliser ensuite pour répondre à la question posée, et, encore mieux, à de nombreuses autres, pour que cela ait valu la peine de s'approprier un modèle.

Cette analyse soutient l'hypothèse qu'il y a déjà situation de malentendu au moment de l'adaptation de la tâche à la séquence d'enseignement, de telle sorte que les connaissances visées n'étant pas précisément définies, une partie des élèves (au moins 5 sur 23) se perdent à un moment où un autre dans une procédure de résolution qui les éloigne des enjeux didactiques de la tâche. La difficulté, pour ces élèves, consiste à transformer l'énoncé de la consigne de manière à obtenir les informations nécessaires pour fournir une réponse. En langage courant, il s'agit d'un malentendu sur la "manière de réfléchir" à cet exercice, et en langage plus technique sur ce que certains auteurs dénomment les "stratégies d'apprentissage" [484], et qui appartient aux méta-connaissances des élèves au sujet de ce type de tâche et de la discipline enseignée.

Remarquons que si l'enseignant avait mis en place un dispositif pour faire émerger cette situation de malentendu, et proposer une analyse extensive de tous les cas de figure imaginés par les élèves, la situation de malentendu aurait pu pleinement participer aux enjeux didactiques. Un tel dispositif pédagogique aurait néanmoins encore allongé une séquence qui est déjà passablement étendue pour permettre aux élèves de débattre entre eux et de mener des activités expérimentales sur les mêmes situations.

6.4.6.2 Commentaire #2 : vers une sémiologie des consignes scolaires

La justification de la réponse à la question de la situation-problème pour la posture (c), chez les élèves qui ont produit des réponses ambiguës, reposent toutes sur une interprétation différente du type d'interaction entre la canne et le plafond et entre le personnage et la canne. L'hypothèse consistant à examiner les opérations logico-discursives procédant à partir de l'illustration dans la consigne permet de redonner leur cohérence à ces réponses ambiguës.

Cette situation de malentendu peut paraître anecdotique, en ce sens qu'elle est directement liée à un contenu spécifique du matériel scolaire, et encore à ce qui est souvent considéré comme secondaire parce que *illustratif* : des schémas. Cependant, même si le détail de cet exemple semble de peu d'importance par rapport à l'enseignement de la physique en général, puisqu'il ne concerne que le schéma donné pour la situation-problème #2 de la séquence didactique étudiée, je pense que c'est un cas particulier qui soulève des questions qui invitent à explorer un domaine de recherche relativement nouveau : la sémiologie des consignes scolaires. Ce domaine mérite que les chercheurs s'y intéressent, pour au moins deux raisons.

484. Dénomination par ailleurs fort malheureuse, puisque, d'une part, pour considérer qu'il s'agit de *stratégie* il faudrait déjà que l'élève dispose de la *conscience* de plusieurs "manières de réfléchir" à sa disposition - alors que dans le cas d'une situation de malentendu comme celle-ci il est bien plus probable que l'élève ne se pose justement pas la question de la meilleure "manière de réfléchir" parmi plusieurs disponibles - et d'autre part, il paraît péremptoire de présumer d'un *apprentissage* avant d'examiner en détail ce qui se déroule dans l'exécution des procédures et opérations de l'élève. Plus vraisemblablement, les élèves concernés par la situation de malentendu ne réfléchissent *pas* à la modélisation, plutôt qu'ils y réfléchissent *mal* ou, autrement dit, ils n'adoptent aucune stratégie plutôt qu'une mauvaise stratégie.

Premièrement, le matériel scolaire nécessite presque toujours ce genre d'interprétations des détails des consignes - dont le contenu est évidemment à chaque fois spécifique au matériel utilisé - au cours desquelles des situations de malentendu peuvent apparaître. Ces situations de malentendu, comme nous l'avons vu, ne sont pas toujours repérables à partir de l'évaluation sommative des réponses des élèves à la question posée. Elles peuvent, de manière plus discrète, porter sur le choix d'une procédure, voire sur le temps passé dans des interprétations considérées comme inutiles pour l'activité de didactique des sciences proposée. Elles conduisent une partie des élèves à obtenir des notes suffisantes sans avoir atteint les objectifs d'apprentissage. Dans d'autres cas de figure, elles peuvent conduire les élèves à penser eux-même n'avoir rien compris de la discipline enseignée, alors que l'incompréhension ne porte que sur la tâche à effectuer, et non sur les connaissances à acquérir.

Deuxièmement,la dimension sémiotique a été peu étudiée en recherche, et elle est souvent considérée comme allant de soi dans les pratiques scolaires. Ouvrir ce domaine de recherche peut offrir des améliorations importantes aux processus de communication et d'apprentissage sur le terrain. Les difficultés rencontrées par ces élèves mettent en évidence que la tâche qui leur incombe, à savoir de comprendre ce qu'ils doivent faire à partir de schémas, d'expressions verbales et de leurs habitudes de classe, ne va pas de soi : c'est un défi cognitif au moins aussi important que les objectifs d'apprentissage en physique. Pourtant, cette interprétation de la situation, dans l'enseignement étudié, n'est pas un objet d'enseignement : il demeure implicite.

Cette situation de malentendu fait émerger une problématique plus spécifique : celle de l'interprétation d'une consigne faisant usage de plusieurs registres sémiotiques. Il y a dans le passage d'une schématisation graphique à une schématisation discursive une marge de liberté importante pour l'élève, puisqu'elle ne se repose pas sur les opérations logico-discursives fournies par l'enseignant. La consigne écrite de la posture (c) fournit l'opération γ {canne} $\rightarrow$ {canne appuyant sur le plafond}. Cette opération logico-discursive est bien plus contraignante que l'illustration de la posture (c), qui offre une plus grande liberté d'interprétation. Cette marge de manœuvre est discutée par Watzlawick et al. (1967/1972) au sujet du passage d'une *communication analogique* à une *communication digitale*. Dans la situation de malentendu analysée, le langage fonctionne comme un instrument cognitif qui permet de passer d'une schématisation graphique relativement indéterminée quant à la nature du contact entre le plafond et la canne, à une schématisation discursive plus précise ou spécifiée quant à ce contact, en effectuant des opérations logico-discursives. Or, c'est précisément en soutenant l'hypothèse que les élèves fournissant des réponses ambiguës ont utilisé en priorité l'illustration, plutôt que la partie verbale de la consigne, que l'analyse a permis de reconstituer la cohérence de leurs réponses.

Sans une dernière remarque, ce commentaire laisserait naïvement penser que l'explicitation verbale la plus complète possible permettrait d'exclure toute situation de malentendu. Si une plus grande explicitation au niveau du discours peut contribuer à éviter les situations de malentendu analysées, dans le contexte particulier de cette étude, le langage verbal n'est évidemment pas non plus un instrument permettant de garantir une compréhension mutuelle. Cela me conduit à faire deux remarques. Premièrement, l'attention donnée par les élèves et l'enseignant à l'usage précis des termes adéquats est cruciale à la compréhension

mutuelle, puisque c'est le médiateur principal de la construction d'une intersubjectivité. Deuxièmement, sur le plan méthodologique, l'analyse elle-même repose également sur l'usage d'un langage le plus cohérent possible mais *relativement à un point de vue particulier*. Sans cette précaution, il serait trompeur de se reposer sur le langage verbal énoncée par les élèves pour investiguer leur apprentissage, leur pensée.

Fort à propos, le cadre théorique de la logique naturelle nous invite à faire preuve de prudence quant à la synonymie, du point de vue des interlocuteurs, entre des termes semblables. Cette remarque me conduit à problématiser des points de méthode, dans le commentaire suivant.

6.4.6.3 Commentaire #3 : réflexion méthodologique et développement de la logique naturelle

Les divergences de point de vue, dans cette situation de malentendu, portent en particulier sur l'usage de prédicats différents (voir table 6.1, p. 508). Cela nous conduit à soulever un point de méthode quant aux opérations de la logique naturelle : Grize n'a pas prévu d'opération d'élaboration des prédicats, mais nous observons néanmoins ici quelque chose de cet ordre-là, en particulier quand deux prédicats pourtant identiques ne peuvent pas vraiment être considérés, dans la situation d'interlocution, comme synonymes. Sans doute que l'usage des prédicats se fait par les opérations de détermination dans la schématisation, et dans ce sens nous pouvons considérer les déterminés qui en résulte comme description des divergences. Mais peut-être aussi qu'il serait utile dans certains cas de considérer des *classes-prédicat* au même titre que nous avons des *classes-objet*, sur lesquelles porteraient des opérations d'élaboration de la classe-prédicat de manière analogique aux opérations γ_i pour la classe-objet. Cela permettrait de distinguer {manger, se goinfrer} de {manger, se sustenter} comme la logique naturelle distingue {maison, chalet} de {maison, grande villa avec piscine}.

Ci-dessous, je pars d'un exemple issu de la situation de malentendu analysée pour proposer encore une autre possibilité de développement pour la logique naturelle. Ce commentaire vise bien l'ouverture d'une discussion méthodologique permettant les développements les plus utiles du modèle, et non une prise de position ferme sur les questions soulevées.

Dans la situation de malentendu analysée, le prédicat $\pm appuyer$ n'a pas toujours le même sens selon les points de vue[485]. Par exemple, $\pm appuyer\ sur$ est précisé par Sylvie par l'usage de $\pm toucher$. Dans la schématisation de l'enseignant, $\pm appuyer$ résulte d'une opération complexe $v_{E.0}$ (voir p. 510) et prend le sens technique de $\pm exercer\ une\ force\ sur$, ce qui est incompatible avec la signification de $\pm toucher$. Même si la logique naturelle repose beaucoup sur le choix des termes effectués par les interlocuteurs pour analyser leur schématisation, elle permet de traiter ce problème à condition d'introduire le principe énoncé ci-dessous, lorsque la finesse de l'analyse l'exige.

485. En outre, une analyse du français parlé en Suisse romande ne serait pas inutile ici, l'expression (régionale ?) "appuyer sur" n'étant pas sans lien avec l'ambiguïté du prédicat, que nous avons constatée dans cette situation de malentendu.

Principe : les classes-objets ou prédicats gardent, relativement à un point de vue particulier, la trace sémantique des opérations logico-discursives auxquelles ils ont participé antérieurement au cours de la construction d'une schématisation donnée.

Ce principe est tout à fait cohérent avec la manière dont les objets de discours sont modélisés en "classes", qui contiennent tous les termes utilisés dans les occurrences précédentes au cours de la construction d'une schématisation donnée. Il permet de les considérer comme des synonymes, relativement à la situation d'interlocution et au contexte général. Ce principe oblige à analyser non seulement la schématisation comme un produit, mais également à analyser sa construction, dans les cas extrêmement délicats comme celui du prédicat $\pm appuyer$ que nous discutons ici.

En ce sens, et dans l'esprit de la logique naturelle, la reconstruction des points de vue des interlocuteurs fait usage de manière complémentaire (i) d'une analyse du discours produit et (ii) d'une analyse micro-génétique de la construction progressive du discours. Pour notre exemple avec le prédicat $\pm appuyer$, il faudrait ajouter la référence à l'opération qui en a permis l'introduction dans la schématisation de l'enseignant pour mieux décrire le sens technique que prend ce terme chez lui, et auquel les élèves n'ont pas forcément accédé, en écrivant : $(\upsilon_{E.0} \Rightarrow)\pm appuyer$. De cette manière, le prédicat $\pm appuyer$ pourrait, à la fin d'une longue schématisation qui en fait un usage abondant, être enrichi de la trace sémantique de nombreuses opérations qui seraient précisées dans la parenthèse, ce qui prendrait une forme semblable à ceci : $(\eta_1 \Rightarrow, \theta_2 \Rightarrow, \theta_3 \Rightarrow, \delta_4 \Rightarrow, \upsilon_5 \Rightarrow, ...)\pm appuyer$.

Ce développement du modèle de la logique naturelle est particulièrement utile à des analyses en milieu scolaire, puisque la transmission des connaissances qu'un enseignant se donne pour but d'effectuer repose très souvent sur ce processus d'enrichissement d'un vocabulaire qui, en tant que langage, est déjà connu des élèves, mais de manière plus pauvre sur le plan sémantique que dans la construction spécifique d'une schématisation en classe qui permet de l'enrichir, progressivement et en fonction de son usage situé. Ce développement du modèle devrait permettre de contribuer à l'étude d'une vieille question : pourquoi dans certains cas des élèves ou étudiant-e-s apprennent simplement en écoutant un discours, alors que dans d'autres cas ces apprentissages n'ont pas lieu, et nécessite un engagement des élèves dans une conversation où il y a possibilité de formuler et reformuler ? Mon hypothèse est que quelque chose se passe différemment lors de la reconstruction de la schématisation écoutée, qui fait que l'auditeur s'approprie - ou non - l'enrichissement sémantique des classes-objets et des prédicats (pour ne citer que les éléments les plus basiques de la schématisation), enrichissement hérité des opérations mises en œuvre par le locuteur, la conférencière, l'enseignant et dont l'appropriation est plus ou moins aisée selon les expériences antérieures de l'auditeur, son état du moment, sa relation et son rapport social au locuteur, etc.

6.5 Situation #4 : *détente (du ressort)*

6.5.1 Résumé

La quatrième question (l'item #4[486]) du pré-questionnaire invite les élèves à comparer le temps que mettent deux chariots lancés par des ressorts sur un plan horizontal pour parcourir une longueur identique, l'un ayant une masse supérieure à l'autre. Les points de vue des élèves sont d'abord présentés en fonction de leur réponse à la question posée dans l'item #4, selon qu'ils donnent le chariot à la moindre masse ou celui à la masse la plus importante premier à franchir la ligne d'arrivée, ou encore les deux en même temps. Cette première reconstruction sommaire des points de vue permet d'identifier 4 réponses sur l'ensemble des 23 élèves, qui ne sont assimilables ni aux difficultés envisagées par l'enseignant - à savoir une réponse donnant les deux chariots arrivant en même temps à la ligne d'arrivée - ni au modèle enseigné - à savoir le chariot de moindre masse arrivant le premier à la ligne d'arrivée - car ces élèves considèrent que le chariot ayant la plus grand masse arrive premier. Ensuite, une reconstruction plus fine des points de vue des élèves permet de faire la distinction entre deux cheminements : l'un fait référence au moment du lancement des chariots, à l'occasion de la détente des ressorts, et l'autre fait référence au déplacement des chariots des ressorts à la ligne d'arrivée.

Au terme de l'analyse, je ne défends l'hypothèse d'une situation de malentendu que pour un seul des quatre élèves produisant une réponse ambiguë. L'analyse n'a pas permis d'établir une situation de malentendu pour les autres réponses, principalement pour deux raisons : le manque de traces, d'une part, et l'adaptation de l'enseignant au fil de la séquence à une ambiguïté dans la consigne de l'item #4, d'autre part. Si l'enseignant ne s'était pas adapté au fil de la séquence - et en toute intelligence - de manière à intégrer dans son enseignement un problème majeure d'interprétation de la consigne, cette situation de malentendu aurait impliqué un plus grand nombre d'élèves. Cette situation est particulière en ce qu'elle illustre *la négociation du sens d' un exercice* (l'item #4) entre l'enseignant et ses élèves : constatant qu'une majorité des élèves (au moins 14/23[487]) ne s'intéressent pas seulement au déplacement horizontal des chariots *une fois lancés* comme l'escomptait l'enseignant, mais aussi au moment même du lancement des chariots, notamment à la déformation plus ou moins rapide des ressorts en fonction des masses différentes des chariots. L'enseignant présente en conséquence une correction de l'item #4 qui n'adresse plus que le moment du lancer et abandonne sa solution initiale portant sur le mouvement horizontal uniformément accéléré.

Dans les commentaires, je présente un bref échange entre l'enseignant et le chercheur lors de la conception de l'item #4, où ce dernier anticipe l'ambiguïté de la consigne à laquelle l'enseignant s'est finalement adapté en cours de séquence. Cet échange conduit l'enseignant à revoir la consigne, tant la partie discursive

486. La consigne de l'item #4 est disponible en annexe (figure B.18, p. 819).

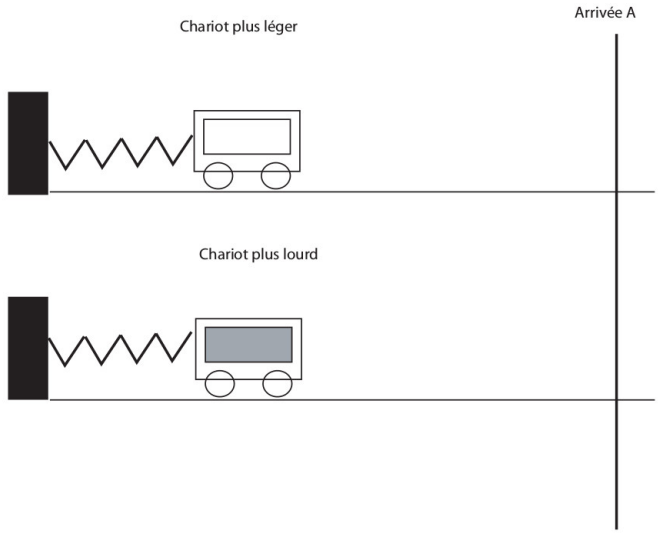
487. Les quatorze réponses retenues comprennent onze réponses qui ne font que référence au moment du lancer, et 3 réponses qui considère les deux moments. Le nombre quatorze constitue une simplification, telle qu'elle a pu apparaître à l'enseignant lorsqu'il a consulté les réponses écrites au pré-questionnaire, et est plutôt sous-estimé. En effet, après l'analyse de la situation de malentendu, j'ajouterais au moins Yves, une quinzième réponse, à cette catégorie. Pour plusieurs élèves (p.ex. Laurie), les traces ne sont pas explicites sur le moment considéré.

que la partie illustrée, mais cette modification de la consigne n'empêche pas l'interprétation divergente anticipée par le chercheur. Par contre, cet échange a peut-être contribué à préparer l'enseignant aux interprétations divergentes des élèves en lui permettant de la reconnaître en situation et de s'y adapter en cours de séquence lorsqu'il constate que de nombreux élèves s'intéressent effectivement au moment du lancer des chariots par les ressorts.

6.5.2 Présentation des incidents critiques

6.5.2.1 Présentation de la tâche

Pour cette analyse, j'examinerai les réponses des élèves à la quatrième question du pré-questionnaire, à laquelle je me référerai par la suite sous l'appellation *item #4* (voir figure 6.23). L'enquête nous conduira également à commenter la conception de l'item #4 et l'anticipation de la situation de malentendu par le chercheur.



Deux chariots de masses différentes, mobiles sur un plan horizontal, sont abandonnés à l'action de deux lanceurs identiques (ressorts déformés de la même manière).

Lorsqu'on lâche le ressort, lequel des deux chariot arrive-t-il le premier au point d'arrivée A?

FIGURE 6.23 – Item #4 du questionnaire.

Comme pour les items #1 et #2 présentés dans les analyses précédentes, l'item #4 a été conçu dans le cadre du travail de mémoire de l'enseignant, notamment dans le but d'effectuer une évaluation diagnostique des préconceptions des élèves avant la séquence d'enseignement (voir chapitre 4.4, p. 289 et suivantes). Étant donné ce but, je vais considérer qu'il y a incident critique lorsqu'une réponse d'élève à l'item #4 ne peut être assimilée ni à une erreur anticipée par l'enseignant ni à une réponse correcte, autrement dit lorsqu'une ou plusieurs réponses d'élève ne sont pas incluses dans la schématisation de l'enseignant [488]. Avant de présenter les réponses des élèves et de discuter d'éventuels incidents critiques, je propose une

488. Pour l'argumentation de ce choix méthodologique, voir la section 6.4, p. 483.

première reconstruction du point de vue de l'enseignant à partir de sa schématisation des réponses correctes et de celles qui correspondent à une erreur qu'il anticipe dans son mémoire professionnel.

6.5.2.2 Présentation des réponses escomptées

Du point de vue de l'enseignant, l'item #4 met en scène deux chariots de masses différentes lancées à l'horizontale de manière identique. La consigne précise que les chariots sont "abandonnés à l'action de deux lanceurs identiques (ressorts déformés de la même manière)." La question attire l'attention sur la vitesse des chariots, en demandant aux élèves de choisir lequel passe en premier une ligne d'arrivée "A", tracée sur le schéma.

Du point de vue de l'enseignant, cet item se justifie en comparaison à l'item #1 (voir situation de malentendu #2), dans l'objectif d'établir une distinction entre la situation "de chute libre" (item #1) et les autres situations impliquant l'inertie et des forces exercées sur des masses différentes. L'objectif de cet item consiste à appliquer les trois lois de Newton avec pertinence, de manière à acquérir ou mettre en oeuvre les concepts de *masse* et d'*inertie* de manière conforme au modèle de Newton. La masse est définie dans le cours théorique comme "la mesure de l'inertie, c'est-à-dire de sa résistance aux variations de vitesse" (voir B.34, p. 864).

L'enseignant explique ces enjeux dans le passage de son mémoire professionnel consacré à l'item #4, reproduit ci-dessous :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire pp.20-21

```
Dans cette situation, on peut poser la question suivante : la masse gênerait-elle
la prise de vitesse? la masse contribue à ralentir le démarrage de l'objet et
cela, d'autant plus qu'elle est plus grande. On peut donc expliquer le fait que
les mouvements de chute libre de deux objets aussi différents qu'une boule de
pétanque et une balle de tennis puissent être identiques (tant qu'on peut
négliger les frottements de l'air) de la façon suivante : celui qui est soumis à
la plus grande force (la boule) est aussi celui qui a la plus grande inertie,
c'est-à-dire la plus grande masse. Dans la mise en mouvement d'un mobile,
la force et la masse interviennent de manière antagoniste. La force agit sur
la mise en mouvement, la masse oppose de l'inertie à la mise en mouvement.
La masse inerte se définit comme une résistance au changement de
mouvement. C'est-à-dire que plus le chariot aura une masse importante et
plus il sera difficile de le faire : accélérer, ralentir ou changer de direction.
Plus un objet aura une masse importante et plus il y aura de frottements.
Par exemple, il y aura plus de frottement sur les roues d'un camion chargé
que sur celles d'un camion vide.
```

Cette schématisation de l'enseignant permet de dégager plusieurs éléments indispensables à la réussite de la tâche.

Premièrement, l'enseignant rappelle un élément fondamental du modèle newtonien, à savoir que la masse fonctionne comme une résistance aux forces exercées sur l'objet. En conséquence, le chariot qui a une masse supérieure démarre de manière ralentie par rapport au chariot qui a une masse inférieure.

Deuxièmement, la différence par rapport à l'item #1 est expliquée par l'enseignant par la particularité de la situation "de chute libre",où l'objet qui a une plus grande masse, et donc une plus grande inertie, est aussi celui sur lequel s'exerce une plus grande force, la force de gravité étant justement proportionnelle à la masse. Dès lors, c'est l'item #1 qui traite d'un cas très particulier du rapport entre masse et accélération, alors que l'item #4 représente des conditions plus courantes[489]. Ces considérations permettent de faire l'hypothèse que l'enseignant s'attend à des réponses qui donnent les deux chariots égaux, c'est-à-dire à une généralisation erronée de la réponse à l'item #1. Cette erreur attendue n'est cependant pas une "préconception" au même titre que les erreurs escomptées pour les items précédents, puisqu'il s'agit d'une erreur qui proviendrait d'un enseignement de la physique partiellement assimilé par les élèves.

Troisièmement, l'enseignant aborde la question des forces de frottement exercées sur le chariot. Sur ce point, l'enseignant fournit la conclusion de son raisonnement à partir du modèle newtonien : "plus un objet aura une masse importante et plus il y aura de frottements". Comment l'enseignant parvient-il à cette conclusion ? Le texte ne nous fournit guère d'indices sur son raisonnement, et celui-ci n'est pas simple à reconstruire : il y a des effets difficiles à anticiper et à modéliser précisément, comme la déformation des pneus sous l'effet du poids des chariots, qui participent au phénomène. Les ressources à disposition des élèves ne permettent pas vraiment l'usage d'un modèle mathématique précis. Au mieux, les élèves peuvent trouver la formule du coefficient de frottement dynamique dans leur Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie (1985), et constater en lisant cette formule que la masse est un facteur d'influence du frottement.

Finalement, dans ce passage du mémoire professionnel, l'enseignant ne vise pas tellement la justification de la réponse attendue - qu'il n'explicite même pas - mais plutôt les enjeux et la richesse des raisonnements possibles à partir de cette tâche. Nous reviendrons sur la solution prévue par l'enseignant lors de la reconstruction de son point de vue, à la section suivante.

Les éléments cités par l'enseignant pour donner une réponse correcte à la question posée peuvent être résumées comme suit :

1. Le chariot qui a une masse supérieure accélère moins que l'autre, de masse inférieure, au moment du lancer par les ressorts, en raison du principe de l'inertie.

2. Le chariot qui a une masse supérieure est plus difficile à ralentir, en raison du principe de l'inertie.

489. Notons toutefois que le commentaire attribué par l'enseignant à "la mise en mouvement d'un mobile", à savoir que "la force et la masse interviennent de manière antagoniste", est également valable pour la situation de chute d'une masse, puisqu'il s'agit d'une reformulation de la loi de la force opposée, mais pas pour la chute "libre" où la seule force considérée est la force de gravitation (soit que la masse se trouve dans le vide, soit que l'on décide de faire abstraction des autres forces). Dans le cours théorique, la troisième est énoncée ainsi : "si une force est exercée par un objet sur un autre, une force égale en module est exercée par le second objet sur le premier, de sens opposé" (p. 864).

3. Le chariot qui une masse supérieure subit des forces de frottement de plus grande amplitude au cours de son trajet, pour diverses raisons liées à son appui sur le sol, à l'écrasement des pneus, etc..

Les points (1) et (3) de la liste ci-dessus vont dans le sens d'une réponse correcte escomptée qui donne le chariot de moindre masse le premier à franchir la ligne d'arrivée A. Par contre, la manière dont le point (2) devrait s'articuler aux autres dans cette réponse n'est pas explicite, puisque l'inertie permettrait de justifier un ralentissement moindre du chariot de plus grande masse, si le frottement n'était pas d'une intensité supérieure pour ce même chariot.

Enfin, l'erreur escomptée par l'enseignant consisterait, pour les élèves, à confondre cette situation horizontale avec la situation de "chute libre" - c'est-à-dire de chute sans forces de frottement - où le fait de n'avoir à considérer que la force de gravitation et un mouvement dans la direction et le sens de cette force permettent de considérer que tous les objets tombent à la même vitesse, quelle que soit leur masse. Or, ce n'est pas le cas ici, pour deux raisons différentes : premièrement, le mouvement se fait dans un sens et une direction qui ne sont pas ceux de la force de gravitation, et deuxièmement les forces de frottement jouent un rôle important au cours du trajet parcouru par les chariots, ce qui ne permet pas de les négliger (les chariots poursuivraient leur course indéfiniment).

À cette réponse erronée escomptée par l'enseignant, qui consiste à donner la même réponse pour les items #1 et #4 de son questionnaire *par analogie*, je peux ajouter la "préconception" citée par l'enseignant pour l'item #1, qui pourrait s'ajouter à leur réponse sur la base de cette analogie que l'enseignant considère erronée. Par conséquent, l'enseignant peut s'attendre en plus à des réponses erronées qui associent à une plus grande masse une plus grande vitesse, et qui donnent le chariot le plus lourd le premier à franchir la ligne d'arrivée sur la base de cette seule justification qui associe à la masse une accélération plus importante.

6.5.2.3 Présentation des traces

Concernant les traces à disposition, il convient de rappeler que pour l'item #4, comme pour les autres questions utilisées dans le pré-questionnaire, je ne dispose pas d'une évaluation individuelle des réponses des élèves. La question est reprise lors de l'activité Digalo, puis lors des activités expérimentales avec du matériel concret, dans le but de faire travailler les élèves sur la même question à plusieurs reprises au cours de la séquence. Lors de l'activité Digalo à la phase 3 de la séquence, les élèves ne reçoivent pas non plus d'explications supplémentaires sur la consigne de la situation-problème. Pour l'activité expérimentale à la phase 4 de la séquence, ils disposent de deux petites voitures métalliques de masses différentes, d'un lanceur à ressort permettant de les propulser les deux en même temps, et d'un chronomètre manuel.

Vu le manque d'indices à disposition pour reconstruire les points de vue des élèves impliqués dans les réponses ambiguës, je vais compléter les réponses au pré-questionnaire avec des traces issues d'autres moments de la séquence. Ce procédé comprend un risque : les élèves ont peut-être changé leur point de

vue au cours de la séquence [490]. Nous n'avons cependant pas d'autre possibilité pour la reconstruction des points de vue de Laurie, Yves et Barbara sur l'item #4. En conséquence, je ne présenterai pas d'analyse de l'évolution de la situation de malentendu, mais discuterai, le cas échéant, des éventuels changements de point de vue de ces élèves au cours de la séquence directement à l'occasion de leur reconstruction, dans la section suivante.

Pour discuter des réponses des élèves, je distinguerai trois catégories de réponse, selon les enjeux soulevés à l'occasion de la présentation du point de vue de l'enseignant, à savoir :

— les réponses qui donnent le chariot de moindre masse en premier, conforme à la schématisation de l'enseignant ;

— les réponses qui donnent les deux chariots en même temps, conformes à la schématisation de l'enseignant d'un raisonnement par analogie avec la "chute libre" (ou l'item #1 du questionnaire) ;

— les réponses qui donnent le chariot de masse supérieure en premier, qui relèvent peut-être d'une "préconception" associant une plus grande vitesse au chariot le plus lourd, par analogie avec la "préconception" escomptée pour l'item #1 du questionnaire, mais nécessitent une reconstruction plus précise du point de vue des élèves pour en décider.

Première catégorie de réponses

Dans la première catégorie, 16 réponses (sur 23) peuvent être réparties entre deux cas de figure distincts : les réponses majoritaires (11/16) ne s'intéressent qu'au moment du lancer des chariots, alors que d'autres (5/16) prennent en considération le moment du parcours des chariots, qui s'étend des ressorts à la ligne d'arrivée. Voici les réponses qui ne s'intéressent qu'au moment du lancer et donnent le chariot de moindre masse premier à franchir la ligne d'arrivée :

Réponses correctes au pré-questionnaire basées sur le moment du lancer - item #4

```
Alain:
     Le plus léger car une force plus importante par rapport à son poids
     s'exerce qu'avec le chariot le plus lourd
Daniel:
     Le chariot le plus léger arrivera en premier car le ressort aura
     plus de facilité à se tendre.
Ernest:
     le plus léger car le lanceur lancera le chariot plus lourd à une moins
     grand vitesse.
Étienne:
     le chariot plus léger
Ferdinand:
     le plus léger car il est plus propulsé par le ressort que le lourd
Germaine:
```

490. Ce risque est néanmoins mesuré, si nous prenons l'exemple des situations de malentendu précédentes pour lesquelles nous avons effectué une analyse de l'évolution des schématisations des élèves au cours de la séquence : les analyses effectuées pour les situations de malentendu #2 et #3 ont montré que de tels changements sont rares.

```
15      Le plus léger. La force "de propulsion" est la même, comme le chariot
16      plus léger demande moins d'énergie "moteur", il arrivera avant l'autre au point A.
17  Ilona:
18      Le plus léger. Pour que le chariot plus lourd arrive en premier, il
19      faudrait que son ressort soit plus fort.
20  Ophélie:
21      le chariot le plus léger, vu que le ressort est déformé (il a donc
22      moins de puissance!), donc plus le chariot est léger plus il sera rapide.
23  Pierrette:
24      Le chariot le plus léger, car il nécessite moins de force pour le
25      faire avancer. Le chariot le plus lourd aura besoin d'un lanceur plus fort
26      pour être équivalent au léger.
27  Thibault:
28      Le chariot le plus léger arrivera en premier car sa résistance à la
29      force du lanceur est inférieure.
30  Victor: le chariot plus léger car le ressort se "reformera" plus vite donc avec
31      plus de puissance.
```

Ces réponses font apparaître une diversité dans la schématisation de ce qui se passe exactement au moment du lancer. Néanmoins, toutes ces variantes *font écho*[491] à la schématisation de l'enseignant d'une manière ou d'une autre, et peuvent ainsi être considérées comme des réponses conformes à la réponse correcte escomptée. Les réponses les plus proches de la schématisation de l'enseignant sont celles de Germaine, en particulier dans sa référence à une "force de propulsion" identique appliquée sur les deux chariots ; de Pierrette qui formule à sa manière le principe d'inertie pour argumenter ses propos ; et de Thibault, qui utilise le terme "résistance", présenté dans le cours théorique comme une propriété de la masse.

Comme l'enseignant n'est pas très précis dans sa schématisation écrite, je ne relève pas toutes les questions de détails qui se posent à la lecture des schématisations des élèves. Par exemple, les commentaires sur la déformation du ressort, les hésitations sur les termes de "propulsion", "puissance" ou même "énergie" ne constituent pas des incidents critiques dans ce contexte, du moment que l'enseignant n'en a pas non plus fourni une schématisation précise, ni n'a communiqué d'attentes particulières à ce niveau de détail. Ces détails mériteraient néanmoins une discussion.

Étienne ne donne aucune justification, ce qui rend invérifiable le fait que la schématisation ne se base que sur le moment du lancer. J'ai néanmoins placé sa réponse dans cette catégorie, parce que je considère plus probable de faire l'hypothèse d'un raisonnement simple lorsque la justification demeure implicite. Il me paraît moins probable qu'Étienne ait gardé implicite une justification complexe incluant la décélération des chariots dans le contexte étudié.

491. Grize (1996) utilise la métaphore de la résonance du son pour représenter la manière dont une schématisation est reconstruite par le destinataire, dans sa théorie de la communication, plutôt que celle de la transmission télégraphique d'un message codé, qui sert de métaphore au modèle du *traitement de l'information*.

Voici les réponses qui donnent également le chariot ayant la plus petite masse premier à franchir la ligne d'arrivée "A", mais en schématisant la phase de décélération :

Réponses correctes au pré-questionnaire basées sur la phase de décélération - item #4

```
Henriette:
     Le chariot le plus léger. Car avec la même force le chariot plus lourd prens moins
     de vitesse à cause des forces de frottement.
Marie:
     Le chariot le plus léger, parce qu'il a moins de force de frottement.
Rose:
     le plus léger car vu que son poids est inférieur, il y a donc moins de force de
     frottement. Le plus lourd accélère moins à cause du frottement
Urs:
     Le plus léger car il y a moins de frottement sur les roues il a besoin de moins
     d'énergie pour se déplacer mais il en prend plus que le lourd car il va plus vite
Xavier:
     le plus léger car la force de frottement sera moins grande. [dessin] g
```

Ces réponses sont au moins partiellement conformes à la schématisation de l'enseignant dans son mémoire professionnel, et prennent en considération le moment du mouvement des chariots des ressorts à la ligne d'arrivée. Elles font toutes référence à des forces de frottement de moindre ampleur pour "le chariot le plus léger", ce que schématise également l'enseignant dans son mémoire professionnel. Ces réponses considèrent exclusivement le moment du trajet des chariots, à l'exception de Urs qui ajoute aussi une analyse du moment du lancer à sa réponse, ce qui en fait une des réponses les plus complètes. Ce qu'il présente comme un argument - "car il va plus vite" - est plutôt la *conclusion* d'une argumentation qui reste implicite, et porte plutôt sur le moment du lancer des chariots.

Rose déclare que "le plus lourd accélère moins à cause du frottement", ce qui n'est pas une description du mouvement de ce chariot tout à fait identique à la schématisation de l'enseignant, puisque de son point de vue le chariot de plus grande masse décélère davantage que ne le fait le chariot de moindre masse. Néanmoins, cette éventuelle divergence se joue peut-être ici uniquement sur la différence entre les significations courante et technique du verbe "accélérer" : dans un sens technique, le chariot qui a une masse plus importante *accélère* davantage, mais en sens opposé au mouvement, la décélération étant conçue comme une accélération négative et non comme un contraire à l'accélération. *A contrario*, le sens courant a pour signification d'accélération une grandeur toujours positive - qui s'oppose à "freiner" ou "ralentir" - ce qui n'est pas sans poser des difficultés aux élèves lorsqu'il s'agit de transcrire cette accélération en langage mathématique et, à l'occasion, d'y ajouter le signe "-" pour indiquer une valeur négative représentant un sens opposé.

Hormis ces quelques détails, les réponses des élèves correspondent à la schématisation de l'enseignant sur ce qui se passe durant le trajet des chariots jusqu'au franchissement de la ligne d'arrivée. Je ne constate donc aucun incident critique dans ces réponses [492].

Deuxième catégorie de réponses

Dans la deuxième catégorie, trois réponses (sur 23) donnent les deux chariots égaux, conformément aux réponses erronées escomptées par l'enseignant en raison d'une analogie abusive avec la situation de l'item #1 du questionnaire (dans une interprétation de l'item #1 comme une situation de chute libre) :

Réponses au pré-questionnaire correspondant à l'erreur anticipée - item #4

```
Cassandra :
     ils arrivent les deux en même temps. Le chariot le plus léger va
     moins vite mais part plus vite que le chariot le plus lourd. Le chariot le plus
    lourd part moins vite mais accélère ensuite.
Julianne:
     Les chariots arrivent les deux en même temps à l'arrivée, car les forces ne
     changent pas, elles restent pareil. Seule la masse change mais n'agit pas sur les
     forces
Laurie:
     Ils arrivent les deux en même temps à l'arrivée. Le chariot le plus lourd va moins
     vite que le plus léger mais le plus lourd accélère plus rapidement que le plus
     léger.
```

Ces trois réponses présentent toutes une schématisation divergente des raisons pour lesquelles les deux chariots arrivent en même temps à la ligne d'arrivée. La réponse de Julianne correspond bien à l'idée d'une généralisation abusive de la situation de "chute libre", puisqu'elle donne en justification à sa réponse la distinction entre "forces" et "masse", affirmant que "seule la masse change mais n'agit pas sur les forces". Si cette affirmation peut passer pour conforme au modèle en situation de "chute libre" (pour les détails, voir la situation de malentendu #2, relative à l'item #1), elle n'est pas conforme au modèle enseigné lors d'un mouvement horizontal avec des chariots soumis à des frottements, comme le met en scène l'item #4. J'en conclu que Julianne a répondu conformément à l'erreur anticipée par l'enseignant pour l'item #4, et ne relève pas d'incident critique.

Que se passe-t-il pour les deux autres élèves ? Cassandra fournit une schématisation conforme au modèle pour le moment du lancer, considérant que "le chariot le plus léger" "part plus vite que le chariot le plus lourd". Elle coordonne cette analyse du moment du lancer avec une analyse de ce qui se passe pendant le trajet des chariots, où elle considère que "le chariot le plus léger va moins vite" et que "le chariot le plus lourd part moins vite mais accélère ensuite". L'analyse de ce moment n'est pas conforme au modèle, qui présent une plus forte décélération pour le chariot ayant une masse plus importante. Cassandra ne fournit aucune justification à ce que "le chariot le plus léger" aille moins vite, ni à ce que "le plus lourd" "accélère

492. Cette décision se justifie cependant partiellement du fait d'une schématisation relativement ouverte et peu précise quant aux attentes qu'énonce l'enseignant sur cet item dans son mémoire et lors de la correction à l'oral.

ensuite". Je fais l'hypothèse que le raisonnement de Cassandra repose sur une relation directe entre masse et accélération : plus le chariot "est lourd", plus il accélère. Cette relation entre masse et accélération fonctionne dans la situation de "chute libre", et fonctionnerait également si les chariots étaient sur une pente, du fait de l'exercice de la force de gravité. L'enseignant fait également référence à cet effet de la masse (l'inertie) dans sa schématisation en déclarant qu'une masse supérieure fait qu'il devient "plus difficile" de la ralentir.

Néanmoins, la réponse de Cassandra n'est pas conforme au modèle au sens où la relation entre masse et accélération n'est pas *directe*, mais *indirecte* : elle se fait par l'intermédiaire de l'exercice de la force de gravité et en fonction du rapport entre les directions et sens de cette force et celles de la trajectoire. Or, dans un mouvement horizontal[493], la force de gravité n'est pas déterminante, puisqu'elle est compensée par la force de soutien du sol ; ce sont les forces de frottement dirigées dans la même direction que le mouvement et à sens inverse qui sont déterminante pour le temps que passent les chariots à effectuer la trajectoire jusqu'à la ligne d'arrivée.

En outre, Cassandra présente un *raisonnement compensatoire*[494], où la différence en faveur du chariot de moindre masse au moment du lancer, est compensée par la différence en faveur du chariot de masse supérieure durant le trajet. Or, pour que la différence d'accélération des chariots durant leur parcours compense exactement la différence d'accélération lors du départ des chariots, il faudrait encore vérifier que les deux effets soient de même ampleur.

J'en conclus que Cassandra répond conformément à la préconception anticipée par l'enseignant pour l'item #1, en plus d'effectuer éventuellement une analogie abusive avec l'item #1 comme l'anticipe l'enseignant, pour ce qui est du déplacement des chariots des ressorts à la ligne d'arrivée. Suivant ce raisonnement, je ne considère pas non plus la réponse de Cassandra un incident critique, mais plutôt une configuration compensatoire (τ : $\xrightarrow{mais}$) entre une réponse conforme au modèle pour le moment du lancer, d'une part, et une réponse conforme à la préconception anticipée pour l'item #1 par l'enseignant, d'autre part. Le résultat est inattendu, et l'opération de configuration compensatoire pourrait être considérée comme un incident critique, si l'enseignant n'avait pas décidé au fil de la séquence d'inclure les deux moments dans la situation-problème[495].

Laurie fournit le même genre de raisonnement, qui coordonne dans une logique compensatoire l'analyse du moment du lancer avec celle de la phase de décélération des chariots. Cependant, la schématisation de Laurie est conforme au modèle enseigné pour la phase de décélération des chariots ("le chariot le plus lourd va moins vite que le plus léger") et erronée pour le moment du lancer ("le plus lourd accélère plus rapidement que le plus léger"). Sur ce dernier point, je ne dispose pas de quoi assimiler le point de vue de Laurie à la schématisation de l'enseignant. Il s'agit donc de faire des hypothèses permettant de

493. L'adjectif horizontal fait référence ici à un plan parfaitement plane et perpendiculaire au vecteur représentant la force de gravitation.
494. Inhelder et Piaget décrivent à de nombreuses reprises ce type de raisonnement chez l'enfant lors de réponses à des questions complexes sur le monde physique (voir p. ex. : Inhelder & Piaget, 1955).
495. Je reviendrai sur cette particularité de cette situation interlocutoire dans la discussion (voir section 6.5.5, p. 559).

reconstruire le point de vue de Laurie sur le moment du lancer, où il y a un incident critique qui nécessite une investigation plus précise.

Troisième catégorie de réponses

Dans la troisième catégorie, quatre réponses (sur 23) donnent le chariot le plus lourd en premier :

Réponses au pré-questionnaire correspondant à l'erreur anticipée - item #4

```
Annette:
     Le chariot le plus lourd arrivera le premier, parce que sa masse est plus grande il
     mettra moins de temps à arriver que le chariot le plus léger
Barbara:
     le chariot le plus lourd car il n'attire pas le sol avec sa lourdeur
Yves:
     Le chariot lourd, car sa masse conséquente augmente son accélération.
Sylvie:
     le chariot le plus lourd car le poid augmente la vitesse en présence d'une force de
     soutien comme un planché, un sol (ex.: dans un bobsley, si la pers. qui la conduit
     est plus lourd qu'une autre, elle a plus de chance d'arriver en bas en premier)
```

Parmi ces réponses, celles d'Annette et de Sylvie schématisent les effets de la masse sur l'accélération du chariot durant son déplacement vers la ligne d'arrivée de manière semblable à Cassandra, c'est-à-dire en considérant à juste titre que la force de gravité exercée sur le chariot ayant la plus grande masse est plus importante que celle exercée sur la chariot ayant la plus petite masse, mais en tirant une conclusion erronée en fonction de l'angle entre la direction et le sens du vecteur représentant cette force et la direction et le sens du mouvement. En effet, sur un plan parfaitement horizontal, la force de gravité exercée sur le chariot est à angle droit du mouvement du chariot et a uniquement pour effet d'augmenter la force de frottement, par des effets complexes comme l'écrasement des pneus, notamment.

De plus, toujours selon le modèle enseigné, une plus grande masse oppose proportionnellement plus de résistance aux forces de frottement qu'une masse moindre [496]. Annette et Sylvie répondent conformément à l'erreur anticipée par l'enseignant pour l'item #1, en associant d'emblée une masse plus importante à une accélération plus importante, sans considérer les rapports angulaires entre les forces ni le fait que, dans son mouvement du ressort à l'arrivée, le chariot décélère et n'accélère pas. En fait, tout porte à croire qu'elles font référence à une situation de chute ou de chariots sur une pente, Sylvie allant jusqu'à écrire "elle a plus de chance d'arriver en bas en premier". Or, la ligne d'arrivée n'est pas "en bas".

La réponse de Yves peut être assimilée à une schématisation semblable à celles d'Annette et Sylvie, si on fait l'hypothèse que son argument - "sa masse conséquente augmente son accélération" - concerne le moment du mouvement du chariot ayant la plus grande masse. Mais, si on fait l'hypothèse que cet

496. Cette résistance définie dans le principe d'inertie ou la définition de la masse, se retrouve dans le modèle mathématique dans l'expression algébrique de la loi de la somme des forces, qui a pour effet dans la résolution de ce problème que l'intensité de la somme des forces est divisée par la masse pour obtenir l'accélération du chariot.

argument concerne plutôt le moment du lancer, la réponse de Yves peut être assimilée à la schématisation de Laurie, qui oppose une accélération plus importante du chariot de masse supérieure lors du lancer, à une décélération de ce même chariot par la suite. Comme je présenterai pas la suite des traces permettant de défendre cette seconde hypothèse, je simplifie la présentation en abandonnant dès à présent la première hypothèse. Cette réponse de Yves, complétée comme suit, constitue donc un incident critique : "Le chariot lourd, car sa masse conséquente augmente son accélération [au moment du lancer]".

La réponse de Barbara est énigmatique, au sens où elle apparaît contradictoire au modèle enseigné qui permettrait plutôt de déduire que plus le chariot a une masse importante, plus "il attire le sol", et est réciproquement attiré par le sol. Cette réponse constitue également un incident critique par son caractère inhabituel, et nécessite une enquête.

En synthèse, voici les points de vue à reconstruire de manière détaillée dans la section suivante :

— le point de vue de Laurie et Yves qui justifient leur réponse en considérant que la masse augmente l'accélération du chariot lourd au moment du lancer ;

— le point de vue de Barbara, qui se base sur une analyse de l'attraction entre le sol et la masse du chariot et donne le chariot lourd premier à franchir la ligne d'arrivée "car il n'attire pas le sol avec sa lourdeur".

Voici, pour rappel, les réponses des élèves à analyser plus précisément :

Réponses au pré-questionnaire à analyser - item #4

```
Barbara:
     le chariot le plus lourd car il n'attire pas le sol avec sa lourdeur
Laurie:
     Ils arrivent les deux en même temps à l'arrivée. Le chariot le plus lourd va moins
     vite que le plus léger mais le plus lourd accélère plus rapidement que le plus
     léger.
Yves:
     Le chariot lourd, car sa masse conséquente augmente son accélération.
```

6.5.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue

6.5.3.1 Schématisation de l'enseignant

Du point de vue de l'enseignant, les réponses de Laurie, Yves et Barbara sont erronées, du fait que la réponse à la question de l'item #4 donne le chariot de masse supérieure comme franchissant la ligne d'arrivée en premier. En vue de l'enquête sur une éventuelle situation de malentendu, il est nécessaire de tenter une reconstruction du point de vue de l'enseignant qui nous permette de dire plus précisément en quoi ces réponses divergent effectivement du modèle enseigné.

En guise de reconstruction du point de vue de l'enseignant, je propose une synthèse des éléments implicites à sa schématisation qui interviennent néanmoins dans la procédure attendue de la part des élèves pour réussir. Cette partie implicite a surtout trait aux choix des élèves quant aux éléments à prendre en considération, c'est-à-dire à la modélisation de la situation-problème, mais aussi à certaines opérations cognitives, notamment des transformations comme celle qui va de l'accélération à la vitesse des chariots.

En bref, la procédure attendue consiste à :

— modéliser la situation-problème, par exemple à l'aide d'un dessin des forces appliquées sur les chariots [497], à au moins un des deux moments suivants :
  — le moment du lancer où le chariot accélère jusqu'à quitter le contact avec le ressort ;
  — le moment du trajet du chariot, qui s'étend du ressort à la ligne d'arrivée "A" ;
— estimer de manière qualitative ou numérique, selon le modèle effectué de la situation-problème, le rôle joué par la masse du chariot sur son accélération horizontale.

Mouvement horizontal du chariot

Concernant le moment du parcours du chariot dans son mouvement horizontal du ressort à la ligne d'arrivée "A", il est important de souligner que l'analyse des forces de frottement exercées sur un mobile ne fait pas partie des contenus enseignés à cette classe. Les élèves disposent des lois de Newton, et en particulier du principe d'inertie, et sont plutôt invités à ignorer les forces de frottement. Avec les ressources à disposition, les élèves peuvent considérer que le mouvement d'un chariot, une fois accéléré par la propulsion du ressort, est un mouvement rectiligne uniforme, c'est-à-dire à vitesse constante. La cinématique faisant partie des contenus de l'année précédente, il est attendu qu'ils sachent effectuer cette analyse. Le mouvement horizontal d'un mobile est une situation paradigmatique de l'enseignement des lois de Newton, et est plus particulièrement utilisée habituellement pour démontrer la loi de l'inertie, à savoir "tout corps conserve son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins que des forces n'agissent sur lui et ne le contraignent à changer d'état" (voir figure B.33, p. 854) [498].

Dès lors, le moment du parcours du chariot dans son mouvement horizontal du ressort à la ligne d'arrivée "A" peut être modélisé,

— *si les forces de frottement sont ignorées* :
  • comme un mouvement rectiligne uniforme, c'est-à-dire un mouvement à vitesse constante ;
— *sinon* :

497. Pour une discussion de cette pratique scolaire, se référer à la situation #7, p. 631 et suivantes.

498. Les chariots lancés dans un mouvement rectiligne uniforme à l'horizontale constituent une situation paradigmatique pour étudier cette loi de l'inertie. Les enseignants disposent même dans leur atelier d'un appareillage permettant de faire glisser des chariots sur des coussins d'air à l'horizontale avec un frottement quasiment nul, de manière à "faire une démonstration" de ce principe d'inertie. Lors de discussions informelles, les enseignants du collège ont néanmoins reconnu utiliser rarement cet appareillage, pour des raisons liés aux difficultés de fonctionnement et, surtout, au fait qu'il n'est pas si convaincant pour les élèves de "voir" le phénomène...

- comme un mouvement uniformément accéléré, en l'occurrence une décélération constante due aux forces de frottement.

Le lancer du chariot

Concernant le moment du lancer, le point de vue de l'enseignant peut être reconstruit avec plus de précision à partir de sa schématisation lors de la correction de l'exercice à l'oral en classe plénière, à la phase 5 de la séquence. La figure 6.24 ci-dessous présente l'écriture au tableau noir[499] de l'enseignant. L'enseignant n'écrit rien d'autre au tableau noir, mais projette également la consigne (voir figure 6.23, p. 536) sur l'écran pendant toute son explication.

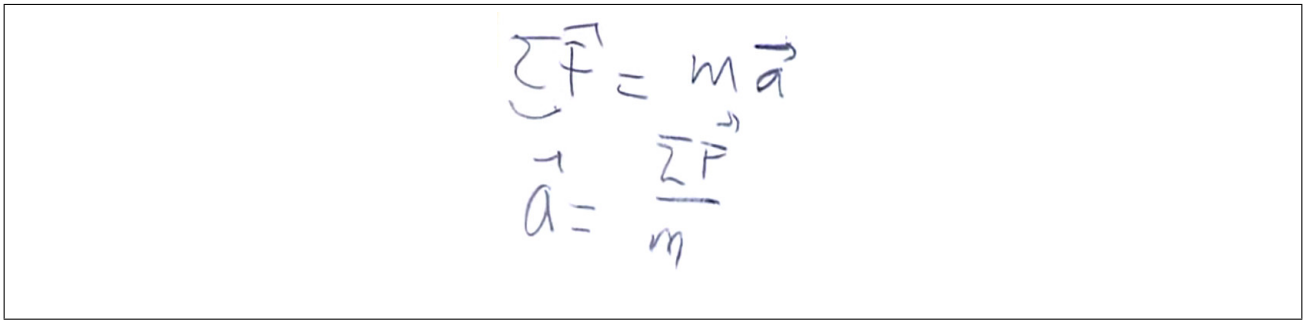


FIGURE 6.24 – Inscription au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de l'item #4 à la phase 5 de la séquence.

Voici le discours oral de l'enseignant à la phase 5 de la séquence, transcrit dans son intégralité :

Enregistrement vidéo - institutionnalisation de l'item #4

E: donc on passe à la quatrième situation (...) alors bien sûr lequel arrive le premier à votre avis?
un élève: le plus léger
E: le plus léger (.) pourquoi? (.) cette fois-ci si on applique (.) la loi de Newton (.) qu'est-ce qu'on a (.) la somme des forces est égale à m a ((écrit au tableau EF=ma)) (...) si (.) j'ai la même force ((souligne EF dans l'équation))(.) si je divise par m ((montre m)) (.) donc a c'est ((écrit a=EF/m)) (.) la somme (.) des forces divisés par a (.) par m pardon ((montre m dans la deuxième équation))(.) qu'est-ce que vous remarquez ici? puisqu'on a la même force ((montre EF dans la deuxième équation))(.) si la masse change ((montre m dans la deuxième équation)) (.) l'accélération change ((montre a dans la deuxième équation)) (.) ça veut dire la vitesse (.) dans ce cas-là (.) change ((tapote a dans la deuxième équation)) (.) ce qu'on appelle (.) la masse ((montre m dans la deuxième équation)) (.) la masse (.) la masse dite à l'inertie (.) donc c'est cette masse (.) pardon (.) c'est cette masse (.) masse qui (.) qui contre (.) bien sûr (.) qui contre (.) la masse qui essaie de résister au mouvement (...) des questions par rapport à (.) la quatrième (.) situation

Demi-classe B - 27.02.2007 8'34"-9'50"

499. Les teintes noire et blanche ont été inversées pour faciliter la lecture.

Dans cette schématisation à l'oral et en fin de séquence, l'enseignant présente le raisonnement le plus concis, de son point de vue, pour répondre que le chariot léger arrive en premier à la ligne d'arrivée "A". Il n'explicite que sa référence à l'expression vectorielle de la loi de la somme des forces, "$\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$", pose l'égalité de "$\sum \overrightarrow{F}$" pour les deux chariots en s'appuyant sur la consigne qui spécifie que les deux "lanceurs" sont "identiques", et en conclut oralement que plus la valeur pour la masse m est grande pour un chariot, plus la valeur a de l'accélération du même chariot est petite. Ce faisant, la schématisation de l'enseignant ne s'intéresse qu'au moment du lancer des chariots par les ressorts, le moment où ils accélèrent, et n'inclut pas l'analyse du parcours des chariots des ressorts jusqu'à la ligne d'arrivée "A".

Cependant, la décision de prendre une somme des forces égale pour les deux chariots n'est pas si évidente. Sur ce point, il faut bien reconnaître que nous sommes confrontés à une situation d'interlocution plus délicate. En effet, l'énoncé de l'item#4 explicite que les chariots "sont abandonnés à l'action de deux lanceurs identiques (ressorts déformés de la même manière)". La classe-objet {action} s'interprète encore relativement facilement comme synonyme du concept de *force*, mais qu'en est-il de {lanceurs identiques, ressorts déformés de la même manière} ? L'opération logico-discursive de l'enseignant consiste, ici, à transformer la classe-objet de l'énoncé écrit, à savoir {action de deux lanceurs identiques, [action] de deux ressorts déformés de la même manière} en {même force} dans sa schématisation orale, ce qui peut s'énoncer :

> $\gamma_{E.15}$: {action de deux lanceurs identiques, [action] de deux ressorts déformés de la même manière} ⇒ {action de deux lanceurs identiques, [action] de deux ressorts déformés de la même manière, même force}

Il ne me paraît pas du tout aisé, pour les élèves, d'opérer cette interprétation. Dès lors, je fais l'hypothèse que c'est peut-être au sujet de cette opération qu'une situation de malentendu a lieu pour les élèves qui fournissent une réponse dont il s'agit de rétablir la cohérence.

Synthèse

En résumé, voici les étapes partiellement implicites escomptées par l'enseignant pour réussir la tâche, que j'ai reconstruites à partir de sa correction orale de l'item #4 à la phase 5 de la séquence :

1. L'enseignant modélise la situation comme un mouvement rectiligne uniforme à l'horizontal, ce qui permet de ne s'intéresser qu'au moment du lancer.

2. L'enseignant utilise l'expression vectorielle de la loi de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$) pour modéliser le moment du lancer des chariots.

3. L'enseignant considère que la somme des forces exercées par les ressorts sur les chariots sont identiques (voir opération $\gamma_{E.15}$).

4. L'enseignant transforme la force exercée par les ressorts en accélération des chariots dans la même direction et le même sens à l'aide de l'expression algébrique de la loi de la somme des forces ($\sum F = m \cdot a$).

5. L'enseignant établit que l'accélération est plus importante pour le chariot ayant une masse inférieure.

Ce résumé permet de montrer que la schématisation de l'enseignant lors de son discours oral à la phase 5 de la séquence n'explicite que partiellement les étapes de son raisonnement. Pourtant, ces étapes sont toutes nécessaires, du point de vue des élèves[500], à la réalisation de la tâche. Plus particulièrement, le discours de l'enseignant attire l'attention plutôt sur les étapes opératoires (3) et (4), et sur la décision finale (5), à savoir l'estimation de l'influence de la masse sur l'accélération des chariots, et n'aborde qu'implicitement le travail de modélisation des étapes (1) et (2), en écrivant l'expression vectorielle au tableau avec le commentaire suivant "on applique la loi de Newton".

6.5.3.2 Schématisations des élèves : leurs cheminements

À présent, je vais tenter de mieux comprendre les réponses au pré-questionnaire des trois élèves pour lesquels j'ai identifié un incident critique, en cherchant des traces de leur points de vue individuels au cours de la séquence. Il s'agit de reconstruire deux points de vue : celui de Barbara, qui est resté énigmatique, et celui de Laurie et Yves, mis ensemble pour avoir fournit une argumentation difficile à interpréter concernant le moment du lancer, selon laquelle le chariot disposant de la masse la plus importante accélère davantage.

Le cheminement de Barbara

Barbara se retrouve avec Sylvie pour les activités des phases 3 et 4 de la séquence. Sylvie a fourni une réponse au pré-questionnaire que j'ai placée dans la catégorie des réponses erronées escomptées, parce qu'elle donne le chariot le plus lourd premier à passer la ligne d'arrivée. Sylvie justifie sa réponse par un argument qui associe le poids d'un objet de sa vitesse : "le poids augmente la vitesse en présence d'une force de soutien comme un planché, un sol". Elle ne procède cependant pas d'une analogie avec la situation de chute (libre), puisqu'elle mentionne la présence d'un "planché, un sol". Cet argument est probablement une généralisation personnelle des situations-problèmes avec des masses qui ne sont justement pas en chute, mais qui sont placées sur des surfaces, horizontales ou en pente. L'exemple qu'elle fournit explicitement sur le graphe Digalo en fournit un indice supplémentaire : "ex. dans un bobsley, si la pers. qui la conduit est plus lourd qu'une autre, elle a plus de chance d'arriver en bas en premier". Les intervention du groupe constitué de Barbara et Sylvie sont visibles sur le graphe Digalo de la demi-classe A reproduit par la figure 6.25 (ci-dessous), et reconnaissables à l'icône (oiseau).

La première intervention (n°44) du groupe est presque identique à la réponse de Sylvie au pré-questionnaire : "le chariot le plus lourd ira plus vite car le poids favorise la vitesse quand il y a une force de soutien (le support)". Par la suite, un débat débute sur le graphe Digalo, et lors de leur seconde intervention (n°50) c'est aussi le point de vue de Sylvie qui semble représenté, notamment à travers l'exemple du bobsleigh : "je sais pas je sais juste que en bobsleigh quand une personne est plus lourd elle va plus vite

500. Je distingue ici l'analyse *a priori* du point de vue de l'enseignant et l'analyse *a priori* du point de vue des élèves, car bien souvent l'expert n'utilise pas les mêmes procédures et opérations que le novice, car ils ne disposent pas des mêmes ressources et contraintes, en termes de connaissances, de maîtrise des conditions de validité de ces connaissances, etc.

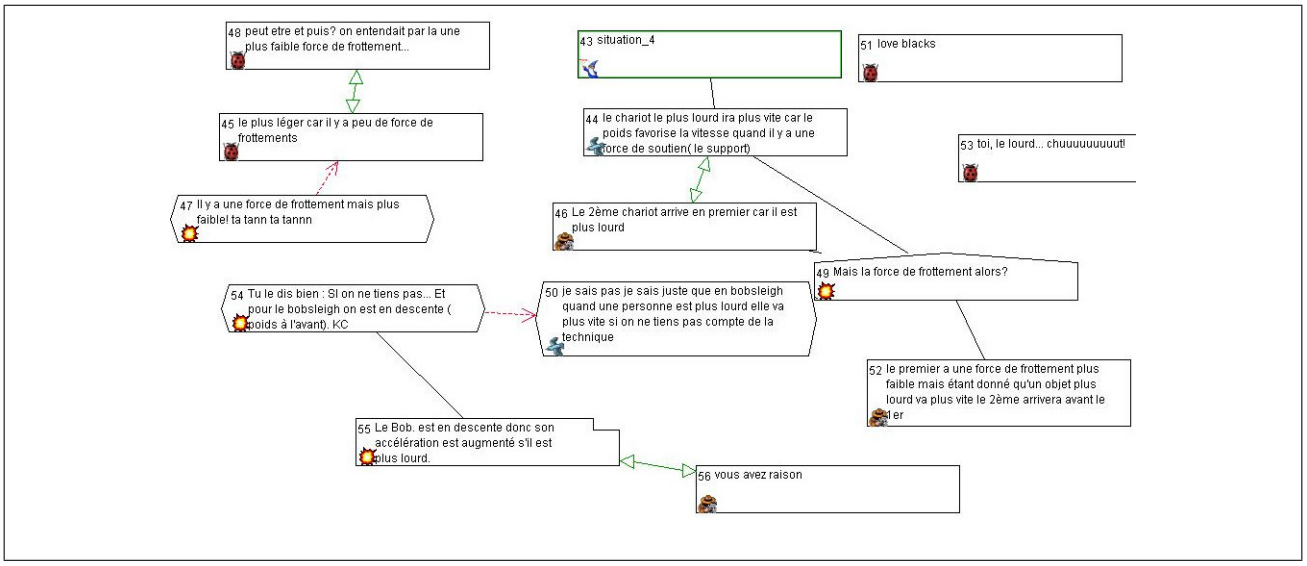


FIGURE 6.25 – Conversation Digalo de la demi-classe A sur l'item 4 du questionnaire.

si on ne tient pas compte de la technique". Barbara partage-t-elle le point de vue de Sylvie ? Les traces ne nous permettent pas de répondre à cette question.

Plus tard dans la séquence, à la phase 4, un désaccord entre Barbara et Sylvie émerge (voir situation de malentendu #5, p. 563 et suivantes [501]), justement au sujet de l'item #4, ce qui ne permet pas d'utiliser les traces laissées par le groupe pour reconstruire le point de vue de Barbara au moment de répondre au questionnaire. Concernant le point de vue de Barbara, je ne dispose donc pas des traces nécessaires pour mener l'enquête.

Le(s) cheminenent(s) de Laurie et Yves : d'une {détente du ressort} à la *vis inertia*

Il s'agit à présent de tenter de reconstruire le ou les cheminement(s) de Laurie et Yves. Je vais dans un premier temps enquêter séparément sur les cheminements de ces deux élèves, du fait qu'ils travaillent dans des groupes différents, pour ensuite discuter de l'éventuelle convergence de leur points de vue respectifs.

Laurie travaille dans un groupe avec Cassandra et Julianne, lors des phases 3 et 4 de la séquence. Ces deux élèves ont fourni une réponse erronée au pré-questionnaire, dont l'argumentation correspond à l'analogie abusive avec la "chute libre" pour Julianne - c'est-à-dire à l'erreur anticipée par l'enseignant pour l'item #4 - et à l'association d'une masse supérieure à une accélération supérieure pour Cassandra - c'est-à-dire à la "préconception" attendue par l'enseignant pour l'item #1. Les interventions de ce groupe sur Digalo se trouvent sur le graphe d'argumentation de la demi-classe A présentée ci-dessus (voir figure

501. On aurait pu utiliser les résultats de l'analyse du désaccord entre Barbara et Sylvie pour reconstruire le point de vue individuel de Barbara, mais cette démarche me paraît douteuse, car la réponse de Barbara à l'item #4 et son point de vue lors du désaccord dans la conversation à la phase 4 de la séquence n'apparaissent pas d'emblée cohérent ensemble, ce qui signifie que le point de vue de Barbara a probablement évolué au fil de la séquence, en particulier au moment de la discussion avec les autres groupes sur Digalo, puisque c'est justement la distinction entre une situation "en descente" (intervention n°55, graphe Digalo de la demi-classe A, p. 551) et à l'horizontale qui structure la solution de Barbara au moment du désaccord, c'est-à-dire le contre-argument proposé par le groupe 💥 (explosion) en réponse au point de vue de Sylvie.

6.25, p. 551), et sont reconnaissables à l'icône (chapeau). C'est le point de vue de Cassandra qui semble l'emporter lors de la première intervention du groupe : "Le 2ème chariot arrive en premier car il est plus lourd".

Un autre groupe (groupe , explosion) leur pose alors une question (intervention n°49) : "Mais la force de frottement alors ? ". Le groupe de Cassandra, Julianne et Laurie répond sur Digalo avec une argumentation qui, là aussi, ressemble plutôt au point de vue de Cassandra (intervention n°52) : "le premier a une force de frottement plus faible mais étant donné qu'un objet plus lourd va plus vite le 2ème arrivera avant le 1er".

L'intervention suivante du groupe est une prise de position dans le débat initié par Barbara et Sylvie à partir de l'exemple de la luge ("bobsleigh"). Le groupe de Cassandra, Julianne et Laurie se rend à l'argument (intervention n°55 : "vous avez raison") des opposants à Barbara et Sylvie, c'est-à-dire à l'argument du groupe (explosion) (intervention n°55) : "Le Bob. Est en descente donc son accélération est augmentée s'il est plus lourd".

En conclusion, des interventions sur Digalo, j'observe d'une part que le groupe dans lequel travaille Laurie reprend plutôt le point de vue de Cassandra, ce qui ne permet pas de trouver des indices supplémentaires quant au point de vue individuel de Laurie. J'observe, d'autre part, que le groupe change d'avis dans la discussion argumentée sur le graphe Digalo, ce qui ne permet pas non plus d'utiliser les traces subséquentes à cette phase de la séquence. Concernant le point de vue de Laurie, je ne dispose donc pas des traces nécessaires pour mener l'enquête.

Par contre, je peux me reposer sur des traces du point de vue individuel de Yves qui apparaissent à l'occasion de l'activité Digalo, à la phase 3 de la séquence. Ces traces sont une opportunité inattendue, puisque lors de cette phase les réponses sont collectives, et nous avons vu avec les exemples de Barbara et Laurie la difficulté que représente la reconstruction d'un point de vue individuel à partir de traces collectives. Dans le groupe dans lequel travaille Yves, les élèves ne parviennent pas à un consensus et décident de poster le point de vue du groupe puis, de manière explicitement distincte, le point de vue de Yves. le graphe Digalo produite par la demi-classe B, où les interventions du groupe de Yves sont reconnaissables à l'icône (coccinelle), est représentée ci-dessous dans la figure 6.26 [502].

Yves et son groupe (Daniel et Nina) produisent les interventions n°81, n°89, n°91. Les interventions n°81 et n°91 sont des prises de position différenciées, respectivement de Yves puis de Daniel et Nina, au sujet de la première intervention du graphe d'argumentation [503], à savoir l'intervention n°80 du groupe (oiseau). Cette intervention fournit une réponse conforme au modèle et focalisée sur le moment où les chariots parcourent le trajet qui s'étend des ressorts à la ligne d'arrivée "A". La prise de position de Yves (intervention n°81) est ensuite contestée par l'intervention n°89 du groupe (chapeau), avec pour

502. Comme les élèves s'interpellent nominalement, les prénoms ont été modifiés sur le graphe Digalo en faveur des prénoms fictifs adoptés.
503. le graphe Digalo a l'avantage de rendre explicite ces liens, du fait que les élèves ont eux-mêmes choisi de lier leur intervention à d'autres interventions.

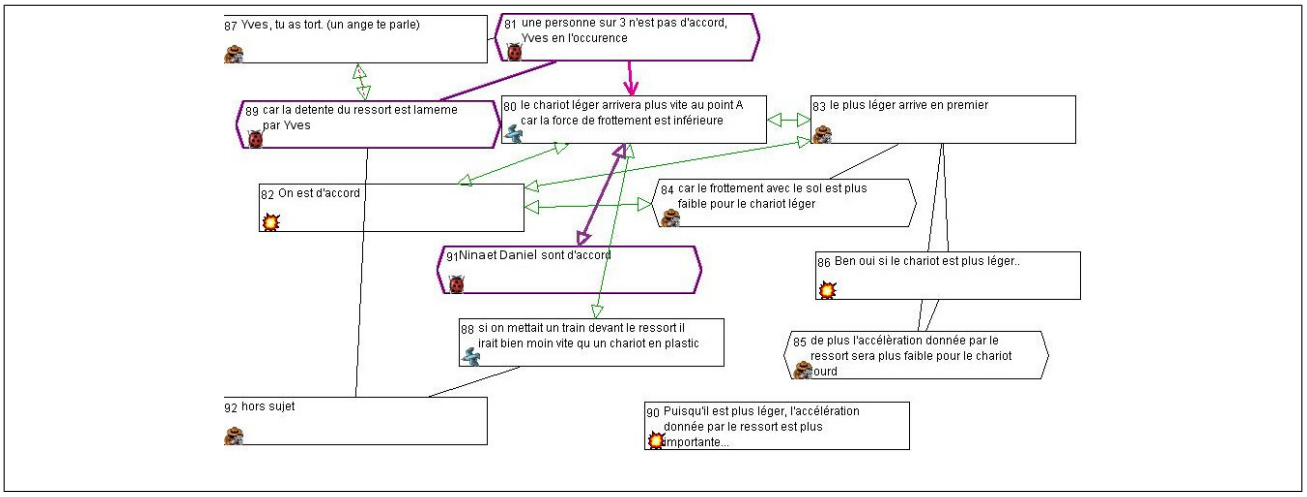


FIGURE 6.26 – Conversation Digalo de la demi-classe B sur l'item 4 du questionnaire.

argument "un ange te parle", ce à quoi Yves répond dans son intervention n°89 avec un argument plus explicite, qui fournit notre principal indice dans cette enquête : "car la détente du ressort est la même".

Une synthèse de l'échange du groupe de Yves avec les autres élèves est fournie à la figure 6.27 [504] (voir ci-dessous), avec une mise en forme de l'enchaînement conversationnel hiérarchisé (Trognon, 1995 ; Trognon & Brassac, 1992).

```
1  80 (hmrt)              le chariot léger arrivera plus vite au point A car la force de
2  |                      frottement est inférieure
3  |____81 (dny)          une personne sur 3 n'est pas d'accord, Yves en l'occurrence
4  |    |____87 (giu)     Yves, tu as tort (un ange te parle)
5  |    |____89 (dny)     car la détente du ressort est la même par Yves
6  |         |
7  |____91 (dny)          Nina et Daniel sont d'accord
8            |____92 (giu) hors sujet
```

FIGURE 6.27 – Transcription d'un échange sur le graphe Digalo (demi-classe B - item 4) avec mention de la hiérarchisation de l'enchaînement conversationnel.

L'intervention fournit un indice pour notre reconstruction du point de vue de Yves, grâce à l'expression du point de vue personnel de Yves sur le graphe Digalo.

L'hypothèse d'une situation de malentendu au sujet du moment du lancer des chariots par les ressorts, et plus particulièrement de l'opération $\gamma_{E.15}$, permet-elle de rétablir la cohérence de cette intervention de Yves, et des réponses de Laurie et Yves au pré-questionnaire ? Nous tenterons de répondre à cette question à la section suivante.

504. Cette présentation prend en compte toutes les interventions du groupe 🐞 (coccinelle), où travaille Yves, et les interventions des autres groupes seulement quand elles y ont été directement liées par les élèves à l'aide du logiciel.

6.5.4 Enquête quant à une situation de malentendu

Le but de cette enquête consiste à rétablir la cohérence du (ou des) cheminement(s) de Laurie et Yves, en partant des traces disponibles, c'est-à-dire :

— de la réponse de Laurie au pré-questionnaire (“Ils arrivent les deux en même temps à l'arrivée. Le chariot le plus lourd va moins vite que le plus léger mais le plus lourd accélère plus rapidement que le plus léger.”) ;

— de la réponse de Yves au pré-questionnaire (“Le chariot lourd, car sa masse conséquente augmente son accélération”) ;

— de l'intervention n°89 de Yves sur Digalo (“car la détente du ressort est la même”).

Disposant d'indices supplémentaires pour reconstruire le cheminement de Yves, je tenterai de montrer que l'hypothèse d'une situation de malentendu étayée à partir de sa réponse et son intervention sur Digalo permettent éventuellement aussi de rétablir la cohérence du point de vue, plus énigmatique, de Laurie.

6.5.4.1 Hypothèses

L'hypothèse d'une situation de malentendu repose sur la difficulté présumée de l'opération $\gamma_{E.15}$ de l'enseignant :

$\gamma_{E.15}$: {action de deux lanceurs identiques, [action] de deux ressorts déformés de la même manière} ⇒ {action de deux lanceurs identiques, [action] de deux ressorts déformés de la même manière, même force}

Quelles opérations sont mises en œuvre par Laurie et Yves en lieu et place de $\gamma_{E.15}$?

Examinons en détail la justification que donne Laurie pour répondre au questionnaire. Cette schématisation se construit avec les opérations suivantes :

$\alpha_{L.1}$: |?| ⇒ {chariot le plus lourd}

$\eta_{L.2}$: |?| ⇒ $\pm aller$

$\mu_{L.3}$: $\pm aller \Rightarrow \pm aller\ moins\ vite$

$\alpha_{L.4}$: |?| ⇒ {chariot le plus léger}

$\delta_{L.5}$: {chariot le plus lourd}, {chariot le plus léger}, $\pm aller\ moins\ vite$ ⇒ (−que le chariot le plus lourd aller moins vite que le plus léger)

$\eta_{L.6}$: |?| ⇒ $\pm accélérer$

$\mu_{L.7}$: $\pm accélérer \Rightarrow \pm accélérer\ plus\ rapidement$

$\delta_{L.8}$: {chariot le plus lourd}, {chariot le plus léger}, $\pm accélérer\ plus\ rapidement$ ⇒ (−que [le chariot] le plus lourd accélérer plus rapidement que le plus léger)

$\tau_{L.9}$: $d_{L.5}, d_{L.8} \Rightarrow d_{L.5} \xrightarrow{mais} d_{L.8}$

Ce qui est spécifique à la schématisation de Laurie, c'est la détermination $d_{L.8}$ (−que le [chariot] le plus lourd accélérer plus rapidement que le plus léger). Comme Laurie détermine également $d_{L.5}$ (−que le chariot le plus lourd aller moins vite que le plus léger), on peut faire l'hypothèse que la configuration $\tau_{L.9}$ coordonne les deux déterminés en deux moments : celui du lancer, et celui du parcours. Alternativement, Laurie pourrait opérer une coordination pour le même moment en distinguant vitesse ($d_{L.5}$) et accélération ($d_{L.8}$) d'un chariot au moment du lancer, mais cette hypothèse paraît peu probable en raison du niveau de complexité de la modélisation qu'elle sous-entend. En considérant que la coordination se fait sur les deux moments du lancer et du parcours, il nous reste deux possibilités :

i) Le déterminé $d_{L.5}$ spécifie le moment du lancer et $d_{L.8}$ le moment du parcours.

ii) Le déterminé $d_{L.8}$ spécifie le moment du lancer et $d_{L.5}$ le moment du parcours.

Dans l'hypothèse (i), Laurie utilise $\pm aller$ dans le sens de l'impulsion ou vitesse initiale dans la situation-problème, et sa justification ($d_{L.8}$) est alors semblable à celle de Cassandra et Sylvie : il s'agit de la préconception attendue par l'enseignant pour l'item #1, à savoir une relation directe entre une masse supérieure et une accélération plus importante de l'objet.

Dans l'hypothèse (ii), Laurie utilise $\pm aller$ pour le moment du parcours, et $\pm accélérer$ pour le moment du lancer. Dans ce cas, la justification ($d_{L.8}$) peut être assimilée au point de vue de Yves, pour qui le chariot le plus lourd part avec *quelque chose de plus*, désigné par Yves par l'expression "son accélération". Nous trouvons des traces plus précises pour expliciter cette idée dans les schématisations de Yves.

La justification de Yves au pré-questionnaire se construit avec les opérations suivantes :

$\alpha_{Y.1}$: |?| ⇒ {masse conséquente}

$\eta_{Y.2}$: |?| ⇒ $\pm augmenter$

$\alpha_{Y.3}$: |?| ⇒ {accélération}

$\delta_{Y.4}$: {masse conséquente}, {accélération}, $\pm augmenter$ ⇒ (−que la masse conséquente [du chariot lourd] [a] augmenter l'accélération [du chariot lourd])

a. La polyopération de détermination introduit aussi les déterminants (au sens linguisitique), et pour plus de clarté j'ai remplacé "sa" dans "sa masse conséquente" par la référence au "chariot lourd".

À la lecture de ces opérations, la question se pose, notamment, du sens de {accélération} du point de vue de Yves, en particulier du fait de l'usage de cette classe-objet avec $\pm augmenter$: que signifie "augmente son accélération" ? Bien sûr, on peut toujours faire l'hypothèse que l'usage des termes que fait Yves est maladroit et qu'il voulait seulement dire que cette {accélération} du chariot lourd *est plus importante* que celle du chariot léger, mais ce serait faire une assimilation déformante des propos de Yves à la schématisation de l'enseignant que je souhaite justement éviter, de manière à tenter la reconstruction de *son* point de vue.

Qu'est-ce qu'une *augmentation d'accélération* ? Dans le modèle enseigné, c'est une *force*. Autrement dit, $d_{Y.4}$ pourrait être paraphrasé par "la masse conséquente du chariot lourd exerce une force sur le chariot lourd, dans le sens du mouvement", ou quelque chose comme cela. Mais de quelle force s'agit-il ? Il nous faut davantage de traces pour obtenir des indices.

L'intervention n°89 de Yves sur Digalo met en œuvre les opérations suivantes :

$\sigma_{Y.5}$: ... $\Rightarrow \frac{Yves,\ ne\ pas\ être\ d'accord}{(-que\ le\ chariot\ léger\ arriver\ plus\ vite\ au\ point\ A)}$

$\alpha_{Y.6}$: |?| $\Rightarrow$ {détente du ressort}

$\eta_{Y.7}$: |?| $\Rightarrow \pm être\ la\ même$

$\delta_{Y.8}$: {détente du ressort}, $\pm être\ la\ même \Rightarrow$ (−que la détente du ressort être la même [pour les deux chariots])

$\tau_{Y.9}$: |?| $\Rightarrow \sigma_{Y.5} \xrightarrow{car} \delta_{Y.4}$

Cette intervention nous fournit un indice pour évaluer notre hypothèse, parce que la configuration $\tau_{Y.9}$ consiste en une interprétation alternative de la classe-objet {action de deux lanceurs identiques} de la consigne écrite de l'item #4. En effet, l'enseignant effectue l'opération $\gamma_{E.15}$ (voir p. 549) qui conduit à établir une somme des forces égales pour les deux chariots au moment du lancer. Or, Yves considère précisément (voir $d_{Y.4}$) que la "masse conséquente [du chariot lourd] augmente son accélération", c'est-à-dire que les deux chariots ne sont justement pas lancés avec la même force. Au lieu de comprendre que les *forces* exercées par les deux ressorts sont identiques pour les deux chariots, Yves a compris que la "détente" des deux ressorts est identique. Que signifie {détente du ressort} du point de vue de Yves dans cette situation d'interlocution ?

À l'instar de ce que nous avons fait pour la situation #3, je fais l'hypothèse d'une interprétation prenant appui sur l'illustration présentée dans la consigne pour mieux spécifier l'opération $\alpha_{Y.6}$ qui conduit à cette classe-objet {détente du ressort}, en particulier pour tenter d'émettre une hypothèse sur la notion primitive à partir de laquelle la classe-objet est extraite, notée ci-dessus "|?|" à défaut d'une analyse.

Sur l'illustration de la consigne(voir figure 6.23, p. 536), la distance horizontale du ressort détendu est identique pour les deux chariots. Or, si l'on considère que cette illustration représente les ressorts au moment où les chariots quittent leur contact, comme nous y invite la question posée, le ressort poussant le chariot ayant la plus grande masse devrait être effectivement plus court sur l'illustration, car si les deux ressorts exerçaient une force identique sur les deux chariots il faudrait plus de temps au second ressort pour pousser le chariot plus lourd qu'il n'en faut au premier pour pousser le plus léger. En effet, selon le modèle enseigné, le chariot ayant la plus grande masse retient davantage la détente du ressort, parce que la force de réaction qu'il exerce dans la même direction et en sens opposé à la force exercée par le ressort sur le chariot. Autrement dit, les résistances dues à l'inertie des chariots de masses différentes ne conduit pas seulement à ce que l'accélération du chariot ayant la plus grande masse soit moindre - comme le schématise l'enseignant dans son discours oral à la phase 5 - mais conduit également ce même chariot à quitter le contact avec le ressort *plus tard* que ne le fait le chariot ayant une plus petite masse.

À partir de ce raisonnement, une observation fine de l'illustration de la consigne permet de constater que les ressorts sont pareillement *détendus*, et que les deux chariots quittent les ressorts pareillement détendus *en même temps*. Yves peut en déduire que les forces exercées par les deux ressorts ne sont justement pas identiques, mais parfaitement complémentaires aux résistances différentes que les masses des chariots leur opposent, de manière à ce que le lancement soit effectivement simultané pour les deux chariots et que ceux-ci quittent des ressorts pareillement détendus, c'est-à-dire dont la longueur occupée horizontalement est identique.

6.5.4.2 Énonciation des divergences selon les points de vue

Cette analyse nous permet de préciser le sens que prend la classe-objet {détente du ressort} comme suit :

$\alpha_{Y.6}$: |ILLUSTRATION DES RESSORTS DÉTENDUS ET D'UN LANCER SIMULTANÉ DES DEUX CHARIOTS| ⇒ {détente du ressort}

La {détente du ressort} fait référence, selon cette analyse et du point de vue de Yves, à la longueur des ressorts détendus et à la durée du processus de détente, et lui permet d'établir deux forces d'amplitudes différentes exercées sur les deux chariots par les ressorts au moment du lancer. Il nous reste néanmoins à comprendre pourquoi cela conduit Yves à ne pas donner le chariot le plus léger en premier. En effet, comme nous l'avons vu, l'analyse conforme au modèle enseigné du moment du parcours des chariots jusqu'à la ligne d'arrivée suffit, à elle seule, à donner le chariot le plus léger en premier, si l'on tient compte des forces de frottement. Quel est le point de vue de Yves sur le moment du parcours des chariots ?

La seule opération qui nous renseigne un peu sur cette question est $\delta_{Y.4}$, où Yves associe au chariot le plus lourd une "augmentation de son accélération" en raison de "sa masse conséquente". Je vais donc compléter cette opération avec un raisonnement conforme au modèle enseigné pour examiner si cela permet de rétablir la cohérence des réponses[505]. Admettons que Yves raisonne à partir de sa notion de {détente du ressort} tel que je l'ai expliquée ci-dessus : quelles sont les conséquences de ce raisonnement pour la réponse à l'item #4 ?

Si les deux ressorts se détendent sur une distance identique, sur la même durée, et malgré la différence des masses des deux chariots, cela a pour conséquence que les deux ressorts exercent des forces de propulsion sur les deux chariots qui sont proportionnelles à leur différence de masses. Autrement dit, dans l'équation de la loi de la somme des forces ("$\sum F = m \cdot a$"), il faut maintenir a constant au lieu de $\sum F$, comme le fait l'enseignant. Dès lors, au moment du parcours des ressorts à la ligne d'arrivée, l'énergie cinétique du chariot le plus massif sera plus importante que celle du chariot le moins massif. Quand bien même les forces de frottement exercées sur le chariot le moins massif sont moindres par rapport à celles exercées sur le chariot le plus massif, la différence d'énergie cinétique fait que le chariot le plus massif arrive en premier

505. Comme expliqué précédemment, la démarche consiste à opter, quand c'est possible, pour l'hypothèse généreuse, c'est-à-dire à attribuer un raisonnement correct à l'élève chaque fois que cela est possible sur la base des éléments explicites fournis.

à la ligne d'arrivée. Pour le dire autrement, l'inertie du chariot le plus massif sera plus importante que celle du chariot le moins massif, et il sera d'autant plus difficile de le freiner avec des forces de frottement.

Le problème que rencontre Yves, c'est que les concepts d'*énergie* et de *travail* viennent plus tard dans le cours de physique, et qu'il ne dispose donc pas des ressources permettant de passer d'une analyse en termes de *force* à une analyse en terme d'*énergie*. De plus, décider au milieu de la réflexion sur un exercice de changer de concept - de changer d'*outil intellectuel* - est véritablement difficile. Cela nécessite une maîtrise des champs conceptuels (Vergnaud, 1996) - connaître les situations pour lesquelles l'analyse à l'aide des forces est utile, et celles pour lesquelles il vaut mieux utiliser le concept d'énergie - ce qui est un défi sur lequel Newton lui-même est resté bloqué pendant de nombreuses années. En effet, Newton a d'abord proposé dans sa Philosophie de la Nature une *force d'inertie* - "*vis inertia*" (Koyré, 1968) - qui correspond assez bien à ce que Yves utilise ici : du fait de l'impulsion reçue au moment du lancer, le chariot le plus massif dispose d'une "augmentation de l'accélération" pour toute la durée du parcours des ressorts à la ligne d'arrivée (et au-delà), une espèce de *force interne* - la "*vis inertia*" de Newton - qui rend son freinage plus difficile. Ce n'est que dans une seconde version de son modèle, en travaillant à la cohérence de sa théorie, que Newton a éliminé toute *force interne* et construit le concept d'*inertie* à la place[506], de manière à pouvoir abandonner les fondements aristotéliciens considérant le mouvement d'un corps comme une propriété, pour un principe de continuité : ""tout corps conserve son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins que des forces n'agissent sur lui et ne le contraignent à changer d'état" (voir figure B.33, p. 854)". La théorie de l'énergie, qui permet d'aborder de manière plus satisfaisante ces problèmes redoutables pour la physique classique, est construite bien plus tard dans l'histoire du développement de la discipline.

Dès lors, selon le raisonnement de Yves, le chariot ayant une plus grande masse a acquis plus de *force d'inertie*[507], du fait que la "détente" des deux ressorts est simultanée et équidistante sur l'illustration de la consigne de l'item #4.

Laurie partage peut-être le même point de vue que Yves, si on retient l'hypothèse (ii) que l'on a énoncée ci-dessus quant à savoir quelle partie de sa schématisation fait référence au moment du lancer et quelle partie fait référence au moment du parcours des chariots des ressorts à la ligne d'arrivée. Pour Barbara, par contre, les traces disponibles n'ont pas permis d'évaluer la pertinence d'une analyse en terme de situation de malentendu, en particulier parce que son point de vue évolue au cours de la séquence. Nous y reviendrons avec la situation de malentendu suivante. Cette situation de malentendu concerne donc surtout un élève (Yves), éventuellement deux (Yves et Laurie).

506. Une autre partie de ce qui était d'abord attribué à cette force intérieure se retrouve dans la quantité de mouvement : nous pourrions donc considérer cette *vis inertia* comme un concept indifférencié, différencié ensuite dans la version plus avancée de la physique newtonienne en principe d'action et de réaction (pour les analyses instantanées) et en quantité de mouvement ou énergie cinétique (pour les analyses dans la durée).

507. Nous faisons référence à la *force d'inertie* telle qu'elle est définie, puis abandonnée, par Newton au cours de sa construction de la physique, dans le but de donner à voir ce à quoi Yves fait référence par le déterminé (−, que sa masse conséquente augmenter son accélération).

6.5.5 Discussion #1 : conception de la consigne et anticipation de la situation de malentendu

À l'origine de l'item #4, l'enseignant conçoit comme une situation-problème portant uniquement sur le moment du parcours des chariots des ressorts à la ligne d'arrivée "A". À la suite d'un échange avec le chercheur, la consigne a été modifiée tant au niveau du discours écrit que de l'illustration. Je présente ci-dessous une version antérieure de l'item #4, dans la partie gauche de la figure 6.28, côte-à-côte avec la version distribuée aux élèves.

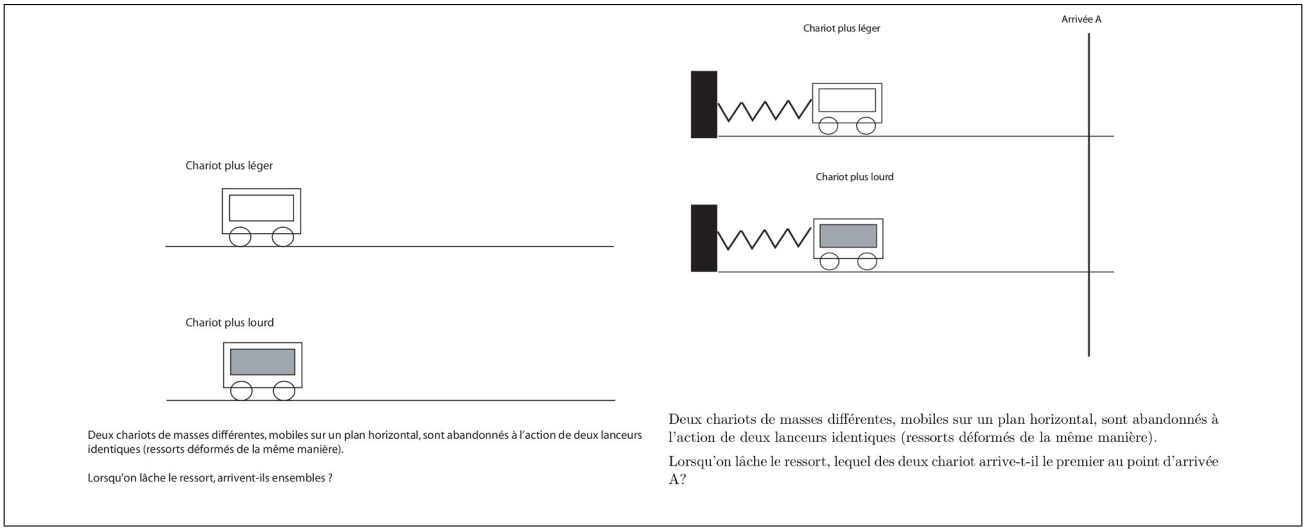


FIGURE 6.28 – Item #4 du pré-questionnaire : version initiale (à gauche) et finale (à droite).

L'enseignant avait sollicité le point de vue du chercheur sur une première version du pré-questionnaire, le chercheur[508] a émis le commentaire suivant concernant la première version de l'item #4 (colonne de gauche de la figure 6.28) :

Extrait d'un courriel adressé à l'enseignant par le chercheur - 28 août 2006

```
1  La question 4 ne me paraît toujours ambigüe. "arrivent-ils ensemble" signifie au bout du
2  ressort ou à la fin de leur mouvement? Sur quelle partie du problème as-tu décidé
3  finalement de porter l'attention: le temps de déformation du ressort, le mouvement
4  global (Energie potentielle du ressort ou vitesse?). Personnellement, je ne sais pas ce
5  que l'on mesure avec cette question, mais c'est parce que je manque d'informations
6  peut-être. Une consigne plus longue serait la bienvenue, par exemple: "est-ce que
7  les deux chariots termine leur mouvement au même moment", mais dans cet exemple
8  ce serait quasiment un exercice sur le frottement... Pas facile. J'opterais pour la
9  formule suivante: "Au moment de se détacher des ressorts, les chariots ont-ils tous les
10 deux la même vitesse, et sinon, lequel va plus vite?".
```

508. Je suis à la fois l'auteur et le chercheur, néanmoins vu la distance temporelle (12 ans) séparant le commentaire cité, je me permets au moment de la rédaction de le considérer comme une trace de la conception du pré-questionnaire, et de citer le chercheur à la $3^{ème}$ personne. En outre, je présente mes excuses pour les erreurs orthographiques et les limites évidentes de ma compréhension de la physique à ce moment-là.

Ci-dessous, je discute deux questions au sujet de la conception de cet item. Premièrement, quelle est la pertinence des modifications que l'enseignant a apportées à la suite du commentaire transcrit ci-dessus, concernant (1) la question adressée aux élèves et (2) l'illustration ? Deuxièmement, quelle est la pertinence de l'anticipation de la *situation de malentendu*, c'est-à-dire l'intuition d'une ambiguïté de la consigne, pour l'interprétation des élèves ?

L'unique modification apportée par l'enseignant à la consigne écrite, à la suite de l'échange transcrit ci-dessus, consiste à passer d'une question fermée orientée vers l'erreur anticipée par l'enseignant ("arrivent-ils ensemble") à une question un peu plus ouverte nécessitant de spécifier le chariot arrivant en premier ("lequel des deux chariots arrive-t-il le premier au point d'arrivée A ?"). Concernant les modifications apportées à la formulation de la question, il n'y a pratiquement pas de changement, sur le fond.

La partie illustrative, par contre, subit une modification plus importante. L'illustration de la première version de l'item #4 de l'enseignant se focalise sur le moment du parcours des chariots, et l'adaptation de cette illustration introduit la ligne d'arrivée "A" citée dans la question, et la présence visuelle des ressorts. Par conséquent, l'illustration de la version retenue pour l'item #4 a pour effet d'attirer davantage l'attention sur le moment du lancer, alors que l'intention du commentaire du chercheur cité ci-dessus visait plutôt à ce que l'enseignant opère un choix entre les deux moments.

Concernant l'intuition d'une potentielle confusion de la référence de la consigne à l'un ou l'autre de deux moments distincts, nous avons vu qu'elle s'est révélée juste, puisque la majorité des élèves s'intéresse au moment du lancer et quatre élèves tentent, en plus, de coordonner l'analyse des deux moments. Cependant, la recherche ne permet pas de savoir si la deuxième version de la consigne est meilleure que la première, relativement à cette confusion. La suggestion du chercheur, qui consiste à plutôt se concentrer sur le moment du lancer pour aborder l'inertie que sur le moment du parcours, a peut-être joué un rôle dans la prise en compte au fil de la séquence des points de vue des élèves qui ont justement décidé de s'intéresser à ce moment-là plutôt qu'à celui du parcours. Le souci du chercheur concernant l'analyse du moment du parcours des chariots, à savoir qu'elle fait intervenir des forces de frottement pour l'analyse desquelles les élèves ne disposent pas tellement de ressources théoriques, s'est également révélé pertinent dans le détail des justifications des élèves[509], mais n'a pas empêché la majorité des élèves qui se sont intéressés à ce moment-là de donner le chariot ayant la plus petite masse premier. Pour finir, l'enseignant ne discute même plus le moment du parcours lors de sa schématisation à l'oral à la phase 5 de la séquence, alors que c'était son but initial, mais se concentre exclusivement sur l'analyse du moment du lancer. Cette adaptation de la part de l'enseignant m'a fait renoncer à considérer le choix du moment analysé comme constituant un incident critique, alors que cela aurait pu être le cas si l'on s'en tient aux intentions de l'enseignant avant ses échanges avec les élèves et le chercheur. Au final, les élèves peuvent considérer que les chariots partent à la même vitesse - c'est la situation-problème telle qu'elle a été pensée au départ - ou que les forces exercées par les ressorts sur les chariots sont identiques - c'est la situation-problème adaptée.

509. Ces justifications varient beaucoup, et manquent visiblement de ressources théoriques enseignées (voir p. 542), quand bien même quelques élèves (5) parviennent à justifier une réponse correcte selon le modèle enseigné, par leurs propres moyens logico-discursifs.

L'intuition du chercheur est-elle une anticipation de la situation de malentendu dans laquelle se retrouve Yves ? Le commentaire du chercheur signale effectivement le risque que les élèves s'intéressent au moment du lancer - à la "détente" pour reprendre le terme de Yves - mais sans aller jusqu'à pointer précisément la question de savoir si les forces exercées par les deux ressorts sont identiques pour les deux chariots, ni la question de savoir si ces chariots démarrent effectivement leur parcours à la même vitesse. Par ailleurs, l'analyse de la situation de malentendu dans laquelle se trouve Yves aboutit à l'hypothèse d'une interprétation de l'équidistance des ressorts détendus pour l'ancrage de la classe-objet {détente du ressort} qui fait justement usage de la partir modifiée de l'illustration : cette modification a peut-être contribué à susciter une situation de malentendu.

Un collègue de l'enseignant a également proposé un commentaire, sur la version modifiée de l'item #4 cette fois, et propose de reformuler la question ainsi : "Si on lâche les ressorts en même temps, lequel des deux chariots arrive le premier au point d'arrivée A ?", avec le commentaire transcrit ci-dessous :

Extrait d'un commentaire manuscrit adressé à l'enseignant par un collègue - 2006

```
1 Même si c'est logique pour nous (et pour l'intérêt du problème), attention aux problèmes
2 de temporalité
```

L'intuition d'un "problème de temporalité" est corroborée par notre analyse de la situation de malentendu, puisque la réponse de Yves retrouve sa cohérence dans l'analyse en prenant en compte une observation fine de l'illustration qui indique que les chariots quittent leur ressort *en même temps*. L'expérience de ce collègue montre aussi le soin apporté à articuler le point de vue de l'expert, pour qui "c'est logique", et celui des élèves.

6.5.6 Discussion #2 : expliquer la difficulté des élèves par la situation de malentendu

Nous avons vu que, du point de vue de l'enseignant, l'item #4 présente le risque d'une analogie abusive du résultat du raisonnement utilisé pour les situations de "chute libre", dont l'item#1 du questionnaire fournit un exemple. Or, une seule élève (Julianne) produit effectivement une réponse de ce type. Les autres réponses non conformes (3 à 5 élèves [510]) ressemblent plutôt à la préconception anticipée par l'enseignant à l'occasion de l'item #1 (plus c'est lourd, plus ça va vite). Dans leurs réponses, ces élèves considèrent qu'une masse plus grande conduit à une accélération plus grande de l'objet, ce qui correspond à la préconception soulevée par l'enseignant à l'occasion de l'item#1 et fonctionne conformément au modèle dans la situation problème avec des chariots sur une pente, dont l'item #4 se distingue pour représenter une trajectoire effectuée sur un plan horizontal, quand bien même les chariots sont également mis en scène. Finalement, seules quelques réponses (1 à 3 élèves) proviennent éventuellement de la *situation de malentendu* sur le moment du lancer - le cheminement *d'une {détente du ressort} à la* "vis inertia" - dont j'ai fourni l'analyse ci-dessus : celle de Yves, et éventuellement les réponses des élèves qui énoncent un raisonnement compensatoire qui tend à annuler la vitesse supérieure acquise par le chariot de masse supérieure au lancer, avec la plus grande perte de vitesse que subit le même chariot au cours de sa trajectoire.

510. Annette, Cassandra, Sylvie et éventuellement Laurie et Barbara.

Si la situation de malentendu analysée pour Yves n'explique pas, en tant que telle, les difficultés rencontrées par les élèves lors du travail sur l'item #4, elle nous a néanmoins permis d'identifier précisément ce qui est difficile, du point de vue des élèves, c'est-à-dire les opérations logico-discursives pour lesquelles une diversité de réponses peut être constatée, là où les schématisations des élèves illustrent des difficultés, où une diversité apparaît et évoque des errances dans le raisonnement des élèves, à savoir :

— les coordinations compensatoires conduisant trois élèves à donner pour réponse les deux chariots égaux, qui pourraient être évitées en clarifiant les deux moments importants de cette situation-problème, à savoir le moment du lancer et le moment du parcours des chariots des ressorts à la ligne d'arrivée ;

— les confusions avec la situation "de chute libre" anticipée par l'enseignant (1 élève : Julianne), ou avec celle des chariots sur une pente (3 à 5 élèves), qui pourraient être évitées si la situation à laquelle s'applique les outils conceptuels enseignés est explicitement abordée comme faisant partie des savoirs enseignés ;

— la situation de malentendu, qui pourrait être résolue en clarifiant le moment du lancer avec une modélisation plus explicite de l'impulsion donnée aux chariots.

Ces difficultés mettent en évidence le travail de modélisation qui n'est justement pas abordé explicitement par l'enseignant. Peut-on éviter ces difficultés en schématisant de manière plus explicite les processus de pensée permettant de modéliser une situation en physique ? C'est une question qui mérite d'être posée à l'occasion de futures recherches.

6.6 Situation #5 : *le poids des mots*

6.6.1 Résumé

Lors d'une conversation orale[511] au sein d'un groupe d'élèves travaillant à l'item #4 (phase 4 de la séquence), un incident critique apparaît au moment de la rédaction du "rapport expérimental", à savoir la réponse du groupe à la question de cet item. L'incident critique est identifié à partir de sa chute : au terme d'un bref échange, Aurélie et Sylvie haussent le ton et Aurélie transmet le crayon et la feuille pour écrire la réponse du groupe à Sylvie, en lui ordonnant d'écrire "ce qu'elle veut". Cette passation du pouvoir à Sylvie clôt un désaccord au sein du groupe, impliquant Aurélie, Barbara et Sylvie. Comment les élèves en arrivent-ils à cette rupture du dialogue ?

Au niveau de la tâche (item #4) et au niveau chronologique, cette situation de malentendu est liée à la précédente. Je ne l'ai cependant pas présentée comme une évolution de la situation #4, pour deux raisons. Premièrement, une élève (Aurélie) qui a été absente à la phase 3 de la séquence rejoint le groupe et le désaccord apparaît justement à l'occasion de sa demande de clarification. Cette élève introduit une discontinuité dans la construction d'une schématisation partagée par les deux autres élèves du groupe (Barbara et Sylvie), ce qui joue un rôle dans l'apparition de l'incident critique. De plus, cette situation de malentendu se distingue par son objet : elle ne porte pas sur la réponse à l'item #4, réponse qui a obtenu un consensus au sein du groupe, mais sur la manière de raisonner et de "faire de la physique" en classe.

L'analyse met en contraste les points de vue des élèves, et permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu entre les élèves, qui n'implique pas le point de vue de l'enseignant. Aurélie initie l'échange en posant une question, à la suite de quoi Barbara et Sylvie se lancent dans des explications divergentes pour satisfaire la question. La principale divergence identifiée, sur laquelle se construit le désaccord, oppose les schématisations de Barbara et Sylvie quant à la *manière de* réfléchir à la question qui leur est posée, les deux élèves étant d'accord sur la réponse à donner. L'analyse permet de mettre en évidence que Barbara procède en distinguant les exercices où interviennent des objets de masses différentes en deux catégories : ceux où "on ne tient pas compte de la masse", et ceux où au contraire il faut en tenir compte. Autrement dit, Barbara est concentrée sur une procédure de résolution de l'exercice qu'elle a apprise comme une norme. Sylvie, quant à elle, procède à partir des concepts de physique pour réfléchir à la question. En conséquence, elle s'insurge de l'indifférenciation que fait Barbara - et que fera plus tard Aurélie - entre *masse* et *poids*. Barbara parvient pourtant à la même réponse, pour cet exercice, sans faire usage des concepts de physique de manière rigoureuse.

Auditrice de ces schématisations divergentes, Aurélie finit par déclarer ne rien y comprendre, ce qui précipite l'incident critique et se termine par la passation de la feuille de réponse du groupe à Sylvie. La situation de malentendu n'est pas identifiée comme telle par les élèves, Sylvie faisant plutôt l'hypothèse d'un manque de confiance d'Aurélie à son égard, et trouve une résolution sociale (passation du pouvoir à

511. La transcription de l'échange entre les élèves est disponible en annexe (section C.6, p. 915).

l'élève ayant la meilleure moyenne de physique) que cognitive (il n'y a aucun indice de changement d'avis). C'est là un exemple intéressant de situation de malentendu qui ne porte pas directement sur l'interprétation d'un discours de l'enseignant, mais plutôt sur une divergence quant aux finalités de la tâche scolaire elle-même pour les deux élèves en désaccord. Cette situation de malentendu permet ainsi d'investiguer le point de vue de deux élèves lorsqu'elles réfléchissent au problème par elles-mêmes : au lieu de documenter le processus d'appropriation du modèle enseigné - le *dit* de l'enseignant - par les élèves, cette situation nous permet d'étudier la finalité des activités de didactique de la physique du point de vue de ces élèves. La divergence analysée permet de mettre en évidence deux manières d'aborder le travail scolaire du point de vue des élèves : une manière orientée vers des stratégies de résolution spécifiquement apprises pour des tâches qu'il s'agit d'identifier en fonction de la consigne (celle de Barbara) et qui a pour finalité de fournir la réponse escomptée même sans comprendre, et une manière orientée vers l'appropriation des concepts enseignés et leur usage pour la production, laborieuse, d'une réponse à la question posée (celle de Sylvie). Cette situation de malentendu est particulièrement difficile à démêler pour les élèves car elle porte sur leur interprétation de la physique, en tant que discipline scolaire, et sur leur interprétation de leur travail d'élève dans cette discipline : elle porte donc sur un implicite de la communication entre l'institution scolaire et les élèves au cours des nombreuses années de leur scolarisation.

6.6.2 Présentation de l'incident critique

6.6.2.1 Présentation de la tâche

L'incident critique a lieu durant la rédaction du rapport expérimental par le groupe d'Aurélie, Barbara et Sylvie, au sujet de l'item #4, à la phase 4 de la séquence, lorsque les élèves reprennent la question du pré-questionnaire déjà discutée par groupe sur Digalo, pour l'étudier encore une fois à l'aide de postes expérimentaux. Aurélie a manqué la phase 3 de la séquence, et n'a donc pas participé aux échanges sur Digalo.

Le poste expérimental préparé par l'enseignant pour les élèves comporte deux petites voitures en métal de masses différentes, une jaune et une verte, un lanceur à deux places fonctionnant à l'aide d'un ressort, et un chronomètre (voir figure 6.29, ci-dessous).

Les élèves ont pour consigne de mettre en œuvre une expérience permettant de confirmer ou d'infirmer leur réponse à l'item #4 (voir figure B.18, p. 819), peu importe qu'ils partent de leur réponse individuelle donnée lors du pré-questionnaire, ou de leur réponse de groupe écrite sur le graphe d'argumentation de Digalo.

6.6.2.2 Présentation des réponses escomptées

L'activité des élèves, dans cette situation, consiste à répondre une dernière fois, en groupe et sous la forme d'un "rapport expérimental", à la question de l'item #4. Je ne dispose pas, dans l'ensemble du corpus, de traces qui explicitent spécifiquement les attentes de l'enseignant quant à cette activité. Les

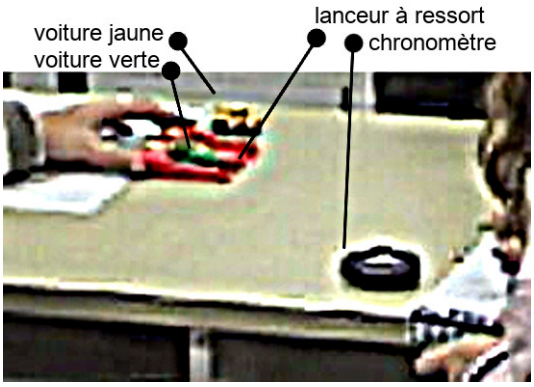


FIGURE 6.29 – Extrait de l'enregistrement vidéographique du dispositif expérimental.

réponses escomptées du point de vue de l'enseignant sont globalement les mêmes que celles énoncées par l'enseignant pour l'item #4 en général, et décrites dans la situation de malentendu 6.5 (voir en particulier la section 6.5.3.1, p. 546 et suivantes). Dans son travail de mémoire professionnel, l'enseignant explicite les attentes quant à l'activité expérimentale sur les items du questionnaire :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant - p. 27

```
1  Dans cette activité, j'ai proposé à mes élèves des TPSP inspirés du questionnaire (...).
2  Toutes les situations du questionnaire sont reproduites au laboratoire. Cette étape est
3  délicate et tout à fait déterminante. Suivant la manière dont elle est gérée, elle peut
4  engendrer un découragement ou, au contraire, une forte motivation qui donne une
5  envie de relever le défi. Les élèves réalisent une réflexion personnelle qui va
6  permettre l'appropriation de la situation et du problème, ainsi que la mise en place
7  d'échanges avec émergence d'un questionnement, d'affirmations plus ou moins
8  précises, de constats, de désaccords, de confrontation d'idées, d'arguments. Les
9  élèves transforment leurs affirmations et le produit de leurs conceptions en
10 hypothèses avec l'obligation de les écrire. L'obligation d'écrire le résultat de la
11 réflexion force l'élève à affronter l'obstacle de la verbalisation et à concrétiser le
12 fruit de son travail ce qui est très important. L'objectif didactique visé est la mise
13 en défaut des conceptions "erronées" des élèves de façon probante. La démonstration
14 doit être convaincante sinon la conception n'en sortira que renforcée!
```

Ces attentes sont exprimées en termes généraux et plutôt orientées sur les effets pédagogiques de l'activité (que je discute à la section 4.5.2.3, p. 331 et suivantes), ne permettent pas de reconstruire les réponses escomptées quant à l'expérience avec les voitures, ni au niveau du cheminement, ni au niveau de la forme (le "rapport expérimental").

Pour présenter de manière plus concrète les attentes spécifiques à la remise par les élèves d'un "rapport expérimental" sur l'item #4, je reproduis ci-dessous deux réponses d'élèves, qui me paraissent constituer les réponses les plus conformes aux attentes : la première se concentre sur le moment du lancer, et la

seconde sur ce qui se passe pendant la trajectoire. Elles fournissent toutes deux quelques justifications [512] permettant de rendre compte du fait observé, à savoir que la voiture la plus légère met moins de temps à parcourir une même distance.

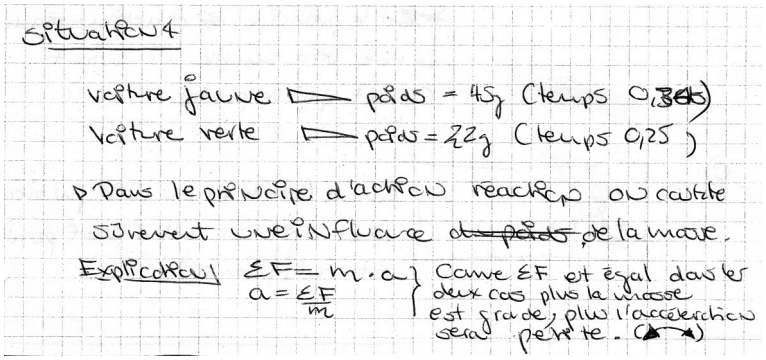


FIGURE 6.30 – Exemple de rapport expérimental justifié et conforme sur l'item #4, rapport de Ernest, Ferdinand et Xavier.

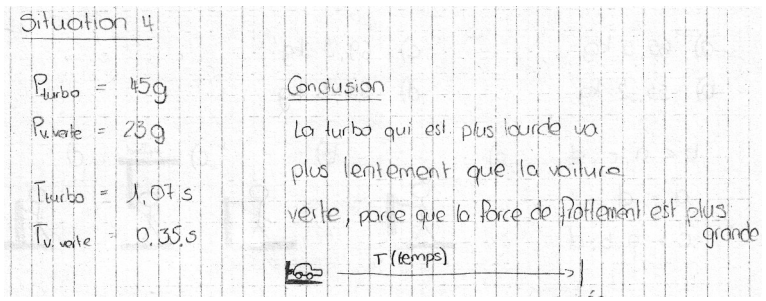


FIGURE 6.31 – Exemple de rapport expérimental justifié et conforme sur l'item #4, rapport de Cassandra, Julianne et Laurie.

Ces deux réponses, à défaut de représenter les attentes spécifiques de l'enseignant, fournissent un *référentiel* pour y comparer la production du groupe discutée dans l'enquête d'une éventuelle *situation de malentendu* pour Aurélie, Barbara et Sylvie. L'enseignant aurait sans doute souhaité plusieurs mesures au lieu d'une seule, et une argumentation plus longue, mais celles-ci sont suffisamment rares pour que les deux exemples présentés ci-dessus fassent figure de bons exemples.

6.6.2.3 Présentation des traces

Le but de l'analyse consiste à reconstruire les points de vue des élèves de manière à expliquer [513] l'apparition de ce désaccord qui, à première vue, paraît pour le moins inattendu. En effet, le groupe travaille plutôt bien ensemble et c'est le seul moment de ce genre dans ce groupe. De plus, la réponse à

512. J'ai appris, à l'occasion de communications informelles avec les enseignants de physique de cet établissement scolaire, que ces justifications ou "argumentations" constituent de leur point de vue l'objectif le plus important de la demande de fournir un "rapport expérimental", mais qu'elles sont également difficiles à obtenir, et souvent bien plus brèves que souhaitées.

513. L'analyse d'une situation de malentendu fonctionne comme une explication, au sens où elle permet de rétablir la cohérence de l'événement dans la situation d'interlocution, et quand bien même ce n'est qu'une hypothèse. Si la démarche aboutit, la description de la situation de malentendu constitue une hypothèse explicative de l'apparition du désaccord.

l'item #4 que ces élèves schématisent à ce moment-là de la séquence, correspond au modèle enseigné, et sur le plan des connaissances que les élèves mobilisent pour répondre, tout semble se passer pour le mieux.

Pour présenter l'incident critique, je me base sur deux éléments du corpus de traces : le contenu du rapport expérimental rédigé par le groupe et un extrait de la conversation entre les élèves qui se termine par l'abandon du dialogue, moment où Aurélie et Sylvie haussent le ton.

Ci-dessous est retranscrit l'intégralité du contenu du rapport expérimental rédigé par le groupe :

Contenu du rapport expérimental - Groupe Aurélie Barbara Sylvie - item #4

```
voiture verte: 24                                    voiture jaune: 45g

même distance:  verte : 0.21s              jaune : plus long, ~4s

deuxième distance (la même pour les deux):
                           verte : 0.25
                           jaune : 0.47

sur un plan horizontal le poids réduit la vitesse. Quand projeté par le ressort,
un poids plus léger prend plus de vitesse car il y a moins de poids donc de force
de retenue.
```

Lors de la rédaction de ce "rapport expérimental", les élèves sont assises en formant un triangle autour d'une table de laboratoire de physique, avec Aurélie d'un côté et Barbara et Sylvie de l'autre. Aurélie tient le crayon et a le rapport devant elle, à sa droite se trouvent les feuilles des autres exercices, et le matériel avec lequel elles viennent de travailler pour la partie expérimentale (les voitures, le lanceur et le chronomètre). Les élèves sont en train d'écrire un rapport avec le résultat de l'expérience, et une argumentation qui justifie ce résultat. Les trois filles ont observé que la voiture jaune passait plus tard la ligne d'arrivée que la voiture verte. Elles ont écrit leurs mesures, et Aurélie demande une explication. Barbara et Sylvie s'adressent principalement à Aurélie, qui les écoute, prête à écrire le rapport. Sylvie appuie sa tête sur sa main.

Le raisonnement enregistré dans cet extrait procède à partir de la conclusion, puisque les élèves ont déjà écrit leur réponse dans le rapport, et recherche une explication, une raison. Elles connaissent la réponse ou, du moins, considèrent l'avoir trouvée à travers l'expérience proposée par l'enseignant.

L'extrait de la conversation entre élèves, reproduit ci-dessous, comprend un échange d'environ une minute, qui débute après la mise en œuvre de l'expérience avec les voitures par les élèves. Les élèves ont pris des mesures de la durée d'une trajectoire définie pour les deux voitures, et ont calculé les vitesses moyennes. Le passage sélectionné est l'ensemble de la conversation du groupe au sujet d'une explication de ce résultat, et comprend les derniers échanges du groupe à l'occasion de leur travail au poste expérimental de l'item #4.

Enregistrement de Aurélie Barbara Sylvie - activité expérimentale - item #4

```
1  Aurélie: là est-ce que vous pourriez m'expliquer pourquoi ((geste non identifié))
2  Sylvie:  fais-gaffe
3  Aurélie: mais j'ai pas fais exprès
4  Sylvie:  ben j'imagine
5  Aurélie: pourquoi heu - pourquoi le fait que ce soit plus léger (au final) c'est
6           pas pareil tu pourrais m'expliquer
7  Sylvie:  je pourrais pas te dire (...)
8  Sylvie:  parce que le poids c'est en fonction de la masse
9  Barbara: parce que le poids là quand on les lâche il est exercé sur sur rien du
10          tout
11 Sylvie:  le poids c'est toujours la même chose (.) il attire toujours en fonction
12          de la masse mais à la même vitesse
13 Barbara: comme il est exercé sur heu - sur aucun objet il tombe directement (.)
14          ben (.) on en tient pas compte (.) alors que là ben le poids il est exercé sur
15          la table (...)
16 Aurélie: alors là j'y pige absolument rien
17 Sylvie:  en fait là ((geste horizontal, pointe le matériel de l'item 4)) ça dépend
18          pas en fonction du poids de ce que - de ce qui est attiré à la terre alors que
19          là ((geste vertical, pointe le poste de l'item 1)) c'est- c'est en fonction du
20          poids
21 Barbara: ouais ouais ben c'est ça
22 Sylvie:  ici [c'est en longueur ((geste horizontal le long de la table))
23 Aurélie: non ici] ((geste horizontal, pointe le matériel de l'item 4)) c'est en
24          fonction du poids et là-bas ((geste vertical, pointe le matériel de
25          l'item 1)) c'est pas en fonction du poids
26 Sylvie:  non en fonction de la masse (.) c'est pas la même chose masse et poids
27          (.) le poids c'est ce qui attire à la terre (...)
28 Sylvie:  va demander au prof si tu me crois pas arrête de faire cette tête comme
29          si je te-
30 Aurélie: moi je comprends pas c'est tout !
31 Sylvie:  le poids c'est pas la même chose que la masse (.) poids n'est pas égal à
32          la masse
33 Aurélie: ouais bon maintenant écris ce que tu voulais écrire (...)
34 Aurélie: bon celui-là il faut encore faire
35 Sylvie:  mais c'est grave si tu crois pas
36 Aurélie: mais je sais pas moi je je j'ai pas compris alors je te laisse écrire là
37 Sylvie:  mais tu veux écrire [où ?
38 Aurélie: ici] ((soupir)) (...)
```

30.01.2007 17'-18'

Dans cet extrait, Sylvie et, en moindre mesure Barbara, tentent de fournir une explication à Aurélie. Sylvie et Aurélie haussent le ton vers la fin de l'échange (lignes 28-30 de la transcription), qui se termine par la transmission par Aurélie de la tâche de rédaction du rapport à Sylvie. Comment en arrive-t-on à cette rupture du dialogue entre les élèves ?

Pour pouvoir répondre à cette question, je vais tenter de reconstruire les points de vue de chacune des trois élèves et examiner combien ces points de vue sont effectivement partagés. Si je disposais d'indices

pour établir que la schématisation co-construite par la conversation du groupe d'élève n'est pas partagée, je ferai l'hypothèse d'une *situation de malentendu* en spécifiant en quoi consiste la divergence entre les schématisations des élèves.

6.6.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue

6.6.3.1 Schématisation de l'enseignant

Je ne dispose pas pour cette analyse du point de vue de l'enseignant auquel comparer les schématisations construites par les élèves, et celle-ci n'est pas utile ici pour se poser la question d'une éventuellement situation de malentendu : il ne s'agit pas d'un éventuel malentendu entre enseignant et élèves, que pourrait éclaircir la comparaison entre les réponses escomptées et celles effectivement fournies par les élèves : il s'agit d'un éventuel malentendu entre élèves, pour lequel il est nécessaire d'analyser le processus de co-construction au fil de la conversation d'une schématisation plus ou moins partagée, qui répond à la demande d'Aurélie de fournir une explication.

Pour cette raison, et contrairement à ce que j'ai fait jusque là, je commenterai la conformité des schématisations des élèves au modèle enseigné au fil de l'analyse, de manière à privilégier une présentation du processus de schématisation et de la séquentialité du dialogue. Pour cette raison également, j'analyserai dans un premier temps la schématisation qui émerge du dialogue des trois élèves comme un processus et une production de groupe (voir la section 6.6.3.2 ci-dessous), et ne tenterai d'identifier des cheminements individuels que dans un deuxième temps (voir section 6.6.4, p. 586).

6.6.3.2 Schématisation des élèves : leurs cheminements en groupe

Je propose dans le tableau ci-dessous (tableau 6.3, p. 575) une analyse de toutes les interventions de l'extrait, à l'exception de quelques interventions n'ayant aucun rapport avec la question de l'item #4 et n'ayant aucune influence sur le déroulement de la conversation (p.ex. les lignes 2-4 de la transcription de la page précédente). Les interventions hors sujet ne sont pas reprises dans le tableau, mais elles peuvent avoir un effet sur le découpage, pour les besoins de l'analyse, de la conversation en "interventions" numérotées. Cela explique la présence de plusieurs interventions successives par la même interlocutrice dans le tableau : une intervention hors sujet ou une longue pause séparent ces interventions dans le cours de la conversation. Il suffit de consulter la transcription de l'extrait (ci-dessus) pour retrouver ces éléments exclus du tableau.

Chaque intervention est numérotée dans la colonne de gauche du tableau, ce qui permet de s'y référer dans l'analyse de l'élaboration progressive de la schématisation au cours de la conversation. Les locutrices sont identifiées par la première lettre des prénoms fictifs. Lorsque je me réfère à une intervention spécifique, je l'abrège I_1, le "i" majuscule en référence à *intervention*, l'indice numéroté en référence à l'ordre d'apparition des interventions dans la construction progressive de la schématisation. Lorsque je me réfère au résultat d'une opération, je mentionne en indice la référence à l'intervention où apparaît cette opéra-

tion [514]. Par exemple, pour un *déterminé* à l'intervention 3, j'écris $d_{I.3}$, ou pour un énoncé à l'intervention 12, j'écris $e_{I.12}$). Les configurés sont décrits à la ligne de l'intervention où la configuration est effectuée, quand bien même ces configurés reprennent le plus souvent des contenus concernant plusieurs interventions et plusieurs locuteurs [515]. Enfin, les déictiques font l'objet d'une liste des références, ci-dessous, pour faciliter la compréhension.

Légende des classes-objets déictiques :

— $\{\text{là}_1, \text{ici}_1, \text{ça}_1\}$ désigne la situation-problème des deux chariots à l'horizontale (item #4) [516] ;

— $\{\text{là}_2, \text{ici}_2, \text{là-bas}_2\}$ désigne la situation-problème d'un exercice précédent (item #1) où les objets sont lâchés à la verticale ;

— $\{\text{là}_3, \text{ici}_3\}$ désigne un endroit sur la feuille du rapport expérimental.

— $\{\text{là}_4\}$ désigne un moment spécifique de la conversation, à l'intervention 13, ou éventuellement l'ensemble de la schématisation qui précède ce moment, de I_5 à I_{12} ;

— $\{\text{ça}_3\}$ désigne $d_{I.2}$, c'est-à-dire (−que le fait que ce soit plus léger ne pas être pareil), ou plus simplement |LA RÉPONSE À L'ITEM #4| ;

— $\{\text{ça}_4\}$ désigne $T_{I.15}$, c'est-à-dire $d_{14} \xrightarrow{alors\ que} d_{15}$;

— $\{\text{ça}_5\}$: l'explication, juste, etc.

Interventions		Opérations
1.	A : là est-ce que vous pourriez m'expliquer pourquoi pourquoi heu	α : |CONSIGNE DE L'ITEM #4| ⇒ $\{\text{là}_1\}$ η : | ?| ⇒ $\pm pouvoir\ expliquer\ pourquoi$ δ : (...) [517] ⇒ (−que vous pouvoir expliquer pourquoi/ ne pas pouvoir expliquer pourquoi) λ : (...) ⇒ (là_1, −que vous pouvoir expliquer pourquoi/ ne pas pouvoir expliquer pourquoi) σ : (...) ⇒ $\frac{A\ demande\ à\ S\ et\ à\ B}{(\text{là}_1, -que\ vous\ pourriez\ m'expliquer\ pourquoi)}$

514. Comme il n'y a que rarement plusieurs opérations du même type par intervention, ce système est suffisant pour fonctionner, tout en présentant un avantage de simplicité par rapport à l'indice numéroté en fonction du locuteur que j'ai utilisé jusqu'ici.

515. Autrement dit, c'est l'intervention au cours de laquelle l'opération considérée est effectuée qui est déterminant pour son indexage. Le fait que certaines opérations, dans un dialogue, opère *sur* des opérations effectuées précédemment par d'autres interlocuteurs constitue l'une des raisons pour lesquelles je n'ai pas cherché à systématiquement attribuer les opérations à des locuteurs précis dans un premier temps. Le dialogue se construit d'une manière où nous pourrions pratiquement considérer que certaines *configurations* sont des opérations logico-discursives *collectives*, du fait qu'elles coordonnent non seulement des opérations antérieures de la locutrice qui opère, mais aussi certaines opérations des autres locutrices, et que sans ces dernières cette opération n'eût jamais apparu. Ces difficultés méthodologiques apparaissent lorsqu'il y a un réel dialogue, ce qui nous fournit ici l'indice d'un travail coopératif entre ces élèves. Un cas comme celui-ci rend la reconstruction des points de vue individuels particulièrement difficile, et pour l'effectuer je ne m'intéresserai que dans un deuxième temps à la question de savoir *qui* participe à tel ou tel point de vue, et je ne discute de ce problème qu'au cas par cas, et seulement pour les opérations les plus pertinentes pour la reconstruction.

516. Tous les déictiques (ici, là, etc.) en "$_1$" font référence à la situation-problème à l'horizontale, ceux en "$_2$" à la situation-problème à la verticale.

517. Pour alléger le tableau, les composants utilisés par l'opération ne sont parfois pas répétés, mais simplement remplacés par la mention elliptique "(...)".

Interventions		Opérations
2.	A : pourquoi le fait que ce soit plus léger au final c'est pas pareil	α : |CHARIOT| ⇒ {fait que ce soit plus léger} η : |ARRIVER LE PREMIER À LA LIGNE D'ARRIVÉE A| ⇒ $\pm$être *pareil* δ : (...) ⇒ (− que le fait que ce soit plus léger ne pas être pareil) λ : (...) ⇒ (au final, − que le fait que ce soit plus léger ne pas être pareil) τ [518] : (...) ⇒ (− que ?) $\xrightarrow{pourquoi}$ (au final, − que le fait que ce soit plus léger ne pas être pareil) σ : (...) ⇒ $\frac{A \text{ demande à } S \text{ et à } B}{(\text{là}_1,\ au\ final,\ -que\ le\ fait\ que\ ce\ soit\ plus\ léger\ n'est\ pas\ pareil)}$
3.	A : tu pourrais m'expliquer	δ : (...) ⇒(− que tu pouvoir expliquer| ne pas pouvoir expliquer) σ : (...) ⇒ $\frac{A,\ demande\ à\ S}{(-que\ tu\ pourrais\ m'expliquer)}$
4.	S : je pourrais pas te dire	δ : (...) ⇒ (− que je [ne] pas pouvoir te dire) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [dit]\ à\ A}{(-que\ je\ [ne]\ pourrais\ pas\ te\ dire)}$
5.	S : parce que le poids c'est en fonction de la masse	θ de I_2 : {fait que ce soit plus léger} ⇒ {fait que ce soit plus léger, poids} α : (...) {poids} ⇒ {masse} η : |expliquer pourquoi| ⇒ $\pm$*être en fonction de* δ : (...) ⇒ (− que le poids être en fonction de la masse) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [dit\ à\ A]}{(-que\ le\ poids\ c'est\ en\ fonction\ de\ la\ masse)}$ τ : (...) ⇒ $d_{I.2} \xrightarrow{parce\ que} d_{I.5}$
6.	B : parce que le poids là quand on les lâche il est exercé sur sur rien du tout	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} α : |CONSIGNE DE L'ITEM #1| ⇒ {là$_2$} α : |OBJETS ILLUSTRÉS SUR LA CONSIGNE DE L'ITEM #1| ⇒ {les} η : |QUESTION SUR LA CONSIGNE DE L'ITEM #1| ⇒ $\pm$lâcher η : |POIDS| ⇒ $\pm$*être exercé sur rien du tout* δ : (...) ⇒ (− que le poids être exercé sur rien du tout) λ : (...) (là$_2$, − que quand les lâcher le poids être exercé sur rien du tout) λ : (...) (quand les lâcher, − que le poids être exercé sur rien du tout) σ : (...) ⇒ $\frac{B,\ [dit\ à\ A\ et\ à\ S]}{(\text{là}_2,\ quand\ les\ lâcher,\ -que\ le\ poids\ est\ exercé\ sur\ rien\ du\ tout)}$ τ : (...) ⇒ $d_{I.2} \xrightarrow{parce\ que} d_{I.6}$
7.	S : le poids c'est toujours la même chose	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} η : {poids} ⇒ $\pm$*être la même chose* μ *modalité* : P_7 ⇒ $\pm$*être toujours la même chose* δ : (...) ⇒ (− que le poids être toujours la même chose) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [dit\ à\ B]}{(-que\ le\ poids\ est\ toujours\ la\ même\ chose)}$

518. J'ai interprété le second "pourquoi" comme une opération d'organisation raisonnée interrogative, alors que le premier "pourquoi" comme une spécification du prédicat "expliquer", plusieurs explications étant possible (fonctionnelle, finale, etc. voir par exemple : Apostel et al. (1970)), ce qui illustre bien la subtilité des usages d'une langue naturelle : le même mot peut tantôt spécifier un verbe, tantôt jouer le rôle d'un coordinateur logique. Cette interprétation revient à considérer le processus de questionnement, sur le plan psychologique et de la construction de l'intersubjectivité, comme la construction par la locutrice d'une schématisation "à trou" dont l'effet pragmatique est d'inviter les interlocutrices à combler les trous : ainsi, à l'opération $\tau \xrightarrow{pourquoi}$ d'Aurélie qui ne relie qu'un seul déterminé (l'*explicandum*), Barbara et Sylvie répondent par des opérations $\tau \xrightarrow{parceque}$ reliant deux déterminés bien définis (*explicandum* et *explicans*).

Interventions		Opérations
8.	S : il attire toujours en fonction de la masse mais à la même vitesse	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} $\Rightarrow$ {poids} θ de I_5 : {masse} $\Rightarrow$ {masse} η : |?| $\Rightarrow$ $\pm attirer\ en\ fonction\ de$ μ *modalité* : $P_8 \Rightarrow \pm attirer\ toujours\ en\ fonction\ de$ μ *modulation* : $P_8 \Rightarrow \pm attirer\ toujours\ en\ fonction\ de\ mais$ à $la\ même\ vitesse$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que [le poids] attirer toujours en fonction de la masse mais à la même vitesse) σ : (...) $\Rightarrow \frac{S,\ [dit\ à\ B]}{(-que\ [le\ poids]\ attire\ toujours\ en\ fonction\ de\ la\ masse\ mais\ à\ la\ même\ vitesse)}$
9.	B : comme il est exercé sur heu - sur aucun objet	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} $\Rightarrow$ {il} υ [519] : $\pm être\ exercé\ sur\ rien\ du\ tout \Rightarrow \pm être\ exercé\ sur\ aucun\ objet$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que [le poids] être exercé sur aucun objet) σ : (...) $\Rightarrow \frac{B,\ [dit\ à\ A\ et\ S]}{(-que\ [le\ poids]\ est\ exercé\ sur\ aucun\ objet)}$ τ : (...) $\Rightarrow \xrightarrow{comme} d_9 \xrightarrow{[alors]} d_{10}$
10.	B : il tombe directement	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} $\Rightarrow$ {poids} η : |POIDS| $\Rightarrow$ ±tomber μ *modulation* : $\pm tomber \Rightarrow \pm tomber\ directement$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que le poids tomber directement) σ : (...) $\Rightarrow \frac{B,\ [dit\ à\ A\ et\ S]}{(-que\ le\ poids\ tombe\ directement)}$
11.	B : on en tient pas compte	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} $\Rightarrow$ {en} η : |POIDS| $\Rightarrow \pm tenir\ compte$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que ne pas tenir compte du poids) σ : (...) $\Rightarrow \frac{B,\ [dit\ à\ A\ et\ S]}{(-que\ on\ ne\ tient\ pas\ compte\ du\ poids)}$
12.	B : alors que là ben le poids il est exercé sur la table	θ de I_1 : {là$_1$} $\Rightarrow$ {là$_1$} θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} $\Rightarrow$ {poids} η : {poids} $\Rightarrow \pm être\ exercé\ sur\ la\ table$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que le poids être exercé sur la table) λ : (...) (là$_1$, − que le poids être exercé sur la table) σ : (...) $\Rightarrow \frac{B,\ [dit\ à\ A\ et\ S]}{(là_1,\ -que\ le\ poids\ est\ exercé\ sur\ la\ table)}$ τ : (...) $\Rightarrow d_{6-11} \xrightarrow{alors\ que} d_{12}$
13.	A : alors là j'y pige absolument rien	η : |EXPLIQUER POURQUOI| $\Rightarrow \pm piger\ rien$ α : |À CE POINT DE LA CONVERSATION| $\Rightarrow$ {là$_4$} θ de I_{13} : {là$_4$} $\Rightarrow$ {y} μ *modalité* : $\pm piger\ rien \Rightarrow \pm piger\ absolument\ rien$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que je piger absolument rien) λ : (...) $\Rightarrow$ (là$_4$, − que je piger absolument rien) σ : (...) $\Rightarrow \frac{A,\ [dit\ à\ B\ et\ S]}{(là_4,\ -que\ je\ pige\ absolument\ rien)}$ τ : (...) $\Rightarrow E_{5-12} \xrightarrow{alors} d_{13}$

519. Pour cette nouvelle opération, se référer à l'exemple page 510, et à la discussion #3 de la situation #3, page 532 et suivantes.

Interventions		Opérations
14.	S : en fait là ça dépend pas en fonction du poids de ce que - de ce qui est attiré à la terre	θ de I_1 : {là$_1$} ⇒ {là$_1$} γ : {poids} ⇒ {poids, poids de ce qui est attiré à la terre} ω de I_2 : (− que le fait que ce soit plus léger ne pas être pareil) ⇒ {ça$_3$} δ : (...) ⇒ (− que ça$_3$ pas dépendre en fonction du poids de ce qui est attiré à la terre) λ : (là$_1$, − que ça pas dépendre en fonction du poids) μ *modalité de dicto* : d_{14} ⇒ (− que ça$_3$ pas dépendre en fonction du poids de ce qui est attiré à la terre, en fait) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [dit\ à\ A]\ en\ fait}{(là_1,\ -que\ ça_2\ [ne]\ dépend\ pas\ en\ fonction\ du\ poids\ de\ ce\ qui\ est\ attiré\ à\ la\ terre)}$
15.	S : alors que là c'est- c'est en fonction du poids	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} θ de I_6 : {là$_2$} ⇒ {là$_2$} θ de I_{14} : {ça$_3$} ⇒ {ça$_3$} δ : ⇒ (− que ça$_3$ être en fonction du poids) λ : (là$_2$, −que ça$_3$ être en fonction du poids) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [dit\ à\ A]}{(là_2\ -que\ ça_3\ être\ en\ fonction\ du\ poids)}$ τ : (...) ⇒ $d_{14} \xrightarrow{alors\ que} d_{15}$
16.	B : ouais ouais ben c'est ça	ω de I_{14} et I_{15} : $T_{I.15}$ ⇒ {ça$_4$} η : |EXPLIQUER POURQUOI| ⇒ $\pm$*être* $ça_5$ δ : (...) ⇒ (− que ça$_4$ être ça$_5$) σ : (...) ⇒ $\frac{B,\ [confirme\ S\ à\ A]}{(-que\ ça_4\ est\ ça_5)}$
17.	S : ici [c'est en longueur	θ de I_{14} : {ça$_3$} ⇒ {ça$_3$} γ : {là$_1$, ça$_1$} ⇒ {là$_1$, ça$_1$, ici$_1$} η : |CONSIGNE DE L'ITEM # 4| ⇒ $\pm$*être en longueur* δ : (...) ⇒ (−que ça$_3$ être en longueur) λ : (...) {ici$_1$, −que ça$_3$ être en longueur} σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [dit\ à\ A]}{(ici_1,\ -que\ ça_3\ est\ en\ longueur,\ ici_1)}$
18.	A : non ici] c'est en fonction du poids	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} θ de I_{14} : {ça$_3$} ⇒ {ça$_3$} θ de I_{17} : {ici$_1$} ⇒ {ici$_1$} δ : (...) ⇒ (−que ça$_3$ être en fonction du poids) λ : (...) (ici$_1$, −que ça$_3$ être [en fonction du poids]) σ : (...) ⇒ $\frac{A,\ [contredit\ S\ à\ S]}{(ici_1,\ -que\ ça_3\ est\ en\ fonction\ du\ poids)}$ τ : (...) ⇒ $\xrightarrow{non} d_{17} \xrightarrow{[mais]} (d_{18} \xrightarrow{et} d_{19})$ σ : (...) ⇒ $\frac{A,\ [contredit\ S\ à\ S]}{\xrightarrow{non} D_{17} \xrightarrow{[mais]} (D_{18} \xrightarrow{et} D_{19})}$
19.	A : et là-bas c'est pas en fonction du poids	θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} γ : {là$_2$, ici$_2$} ⇒ {là$_2$, ici$_2$, là-bas$_2$} δ : (...) ⇒ (−que ça$_3$ [ne] pas être en fonction du poids) λ : (...) (là-bas$_2$, −que ça$_3$ [ne] pas être en fonction du poids) σ : (...) ⇒ $\frac{A,\ [contredit\ S\ à\ S]}{(là-bas_2,-que\ ça_3\ [n']est\ pas\ en\ fonction\ du\ poids)}$

Interventions		Opérations
20.	S : non en fonction de la masse	θ de I_5 : {masse} ⇒ {masse} δ : (...) ⇒ {[ça$_3$ être] en fonction de la masse) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [contredit\ A\ à\ A]}{([là-bas_2],\ -que\ [ça_3\ est]\ en\ fonction\ de\ la\ masse)}$ τ : (...) ⇒ $\xrightarrow{non}$ (d_{18} $\xrightarrow{et}$ d_{19}) $\xrightarrow{[mais]}$ d_{20} σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [contredit\ A\ à\ A]}{\xrightarrow{non}\ (D_{18}\ \xrightarrow{et}\ D_{19})\ \xrightarrow{[mais]}\ D_{20}}$
21.	S : c'est pas la même chose masse et poids	θ de I_5 : {masse} ⇒ {masse} θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} δ : (...) ⇒ (− que masse [ne] pas être la même chose que poids) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [dit\ à\ A]}{(-que\ masse\ [n']est\ pas\ la\ même\ chose\ que\ poids)}$
22.	S : le poids c'est ce qui attire à la terre	θ^s : (I$_5$) {poids} ι de I_8 : $\pm attirer\ en\ fonction\ de$ ⇒ {ce qui attire à la terre}
23.	S : va demander au prof si tu me crois pas	α : |SYLVIE| ⇒ {me} η : |EXPLIQUER POURQUOI| ⇒ $\pm aller\ demander\ au\ prof$ η : |LANGAGE NON-VERBAL DE A| ⇒ $\pm croire$ (•, •)[520] $\delta_{23.1}$: (...) ⇒ (− que tu aller demander au prof) $\delta_{23.2}$: (...) ⇒ (− que tu ne pas me croire) τ : (...) ⇒ $d_{I.23.1}$ $\xrightarrow{si}$ $d_{I.23.2}$ σ : (...) ⇒ $\frac{S,[ordonne]}{(-que\ \Rightarrow\ D_{I.23.1}\ \xrightarrow{si}\ D_{I.23.2})}$
24.	S : arrête de faire cette tête comme si je te-	α : |LANGAGE NON-VERBAL DE A| ⇒ {tête} η : |LANGAGE NON-VERBAL DE A| ⇒ $\pm arrêter\ de\ faire$ δ : (...) ⇒ (− que arrêter de faire cette tête) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [ordonne\ à\ A]}{(-que\ A\ arrête\ de\ faire\ cette\ tête)}$
25.	A : moi je comprends pas c'est tout !	η : | ?| ⇒ $\pm comprendre$ δ : (...) ⇒ (− que je [ne] pas comprendre) μ *modalité de dicto* : d_{25} ⇒ (− que je pas comprendre, c'est tout) σ : (...) ⇒ $\frac{A,\ [dit\ à\ S],\ c'est\ tout}{(-que\ je\ [ne]\ comprends\ pas)}$
26.	S : le poids c'est pas la même chose que la masse	θ de I_5 : {masse} ⇒ {masse} θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} δ : (...) ⇒ (− que le poids [ne] pas être la même chose que la masse) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [répète\ à\ A]}{(-que\ poids\ [n']est\ pas\ la\ même\ chose\ que\ masse)}$
27.	S : poids n'est pas égal à la masse	θ de I_5 : {masse} ⇒ {masse} θ de I_5 : {fait que ce soit plus léger, poids} ⇒ {poids} υ : $\pm$être *la même chose* ⇒ $\pm$être *la même chose*, *être égal* à δ : (...) ⇒ (− que le poids ne pas être égal à masse) σ : (...) ⇒ $\frac{S,\ [répète\ à\ A]}{(-que\ poids\ n'est\ pas\ égal\ à\ la\ masse)}$

520. Comme il s'agit ici de *croire Sylvie*, *croire quelqu'un*, j'ai indiqué la place libre du prédicat par le signe désignant une place vacante pour une classe-objet (•). Lorsque *croire* porte sur un déterminé, ce signe est remplacé par un Δ (voir note de bas de page à l'intervention 29).

Interventions		Opérations
28.	A : ouais bon maintenant écris ce que tu voulais écrire	η : $\lvert ?\rvert \Rightarrow \pm écrire$ ω de I_5, I_{14} et I_{15} : (...) $\Rightarrow$ {ce que tu voulais écrire}[521] δ : (...) $\Rightarrow$ (− que tu écrire ce que tu voulais écrire) λ : (...) (maintenant, −que tu écrire ce que tu voulais écrire) σ : (...) $\Rightarrow \frac{B,\ [ordonne\ à\ S]}{(maintenant,\ -que\ tu\ écris\ ce\ que\ tu\ voulais\ écrire)}$
29.	S : mais c'est grave si tu crois pas	α : |LA SITUATION VÉCUE DANS LA CONVERSATION| $\Rightarrow$ {ça$_6$} η : $\lvert ?\rvert \Rightarrow \pm être\ grave$ η : |LANGAGE NON-VERBAL DE A| $\Rightarrow \pm croire$ (•, Δ)[522] $\delta_{29.1}$: (...) $\Rightarrow$ (− que ça$_6$ être grave) $\delta_{29.2}$: (...) $\Rightarrow$ (− que toi pas croire [d_{20-22}, d_{26-27}]) τ : (...) $\Rightarrow \xrightarrow{mais} d_{29.1} \xrightarrow{si} d_{29.2}$ σ : (...) $\Rightarrow \frac{S,\ [dit\ à\ A]}{\xrightarrow{mais} D_{29.1} \xrightarrow{si} D_{29.2}}$
30.	A : mais je sais pas moi	η : $\lvert ?\rvert \Rightarrow \pm savoir$ (Δ) σ : (...) $\Rightarrow \frac{A,\ [dit]\ ne\ pas\ savoir}{(-que\ [D_{20-22},\ D_{26-27}])}$ τ : (...) $\Rightarrow d_{29} \xrightarrow{mais} E_{30}$
31.	A : je je j'ai pas compris	σ : (...) $\Rightarrow \frac{A,\ [dit]\ [ne]\ pas\ comprendre}{(-que\ [D_{20-22},\ D_{26-27}])}$
32.	A : alors je te laisse écrire là	η : |E_{30} ET E_{31}| $\Rightarrow \pm laisser\ écrire$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que je te laisser écrire) λ : (...) (là$_3$, − que je te laisser écrire) σ : (...) $\Rightarrow$ (−) $\frac{A,\ [dit]\ à\ S}{(là_3,-que\ je\ te\ laisse\ écrire)}$
33.	S : mais tu veux écrire [où ?	υ : $\pm laisser\ écrire \Rightarrow \pm laisser\ écrire,\ vouloir\ écrire$ δ : (...) $\Rightarrow$ (− que tu vouloir écrire) λ : (...) (où, −que tu vouloir écrire) σ : (...) $\Rightarrow \frac{S,\ [demande]\ à\ A}{(où,-que\ tu\ veux\ écrire)}$ τ : (...) $\Rightarrow d_{32} \xrightarrow{mais} d_{33}$
34.	A : ici] ((soupir))	δ : (...) $\Rightarrow$ ([− que je vouloir écrire]) λ : (...) (ici$_3$, [− que je vouloir écrire]) σ : (...) $\Rightarrow \frac{A,\ [répond\ à\ S]}{(ici_3,\ -que\ [je\ veux\ écrire])}$

TABLE 6.3 – Analyse de la conversation entre Aurélie, Barbara et Sylvie sur l'item #4 à la phase 4 de la séquence.

La première analyse en vue de la reconstruction des points de vue des interlocuteur, présentée ci-dessous, suit l'ordre séquentiel de la conversation, et permet de se concentrer sur son processus de construction.

521. Par simplicité, j'ai considéré "ce que tu voulais écrire" un objet de discours ici, plutôt que de m'engager dans une analyse détaillée qui décompose l'ensemble avec deux prédicats, $\pm vouloir$ et $\pm écrire$.

522. Grize (1996) spécifie par la mention d'un Δ une place libre d'un prédicat qui se comble avec un déterminé (D) plutôt qu'avec un classe-objet (N). C'est le cas des "verbes d'attitudes propositionnelle", comme il les nomme, comme dire, croire, savoir, etc.

Dans la section suivante, je procède pour l'enquête analytique à une analyse structurée par point de vue, comparant les contributions de chaque interlocutrice, sur des objets de discours choisis à partir de la première analyse présentée ci-dessous.

À l'intervention n°1

Aurélie initie ce dialogue avec une opération de localisation (λ), comprenant un déictique et une demande de détermination : l'usage du déictique permet de penser qu'il s'agit de quelque chose de perceptible, d'une part, mais indique peut-être aussi la difficulté d'exprimer l'objet de pensée avec des termes clairs et précis. Le choix de la notion primitive à partir de laquelle la sémantisation de $\{\text{là}_1\}$ est faite est sujet à interprétation dans l'analyse de ce passage. Il me paraît suffisamment clair qu'Aurélie se base sur sa perception de la situation-problème, cependant elle peut penser à la situation-problème dans son ensemble telle qu'elle apparaît sur le dessin fourni dans la consigne de l'exercice - les deux chariots projetés par un lanceur à l'horizontale etc. - ou au résultat de l'expérience qui vient de se terminer avec les deux voitures, ou encore à ce qu'elle considère comme la partie la plus importante à expliquer, selon sa compréhension de la consigne de l'exercice. Dans un cas comme celui-ci, l'analyste dispose d'une certaine marge de manœuvre pour dénommer la notion primitive. Il est possible, par exemple, de choisir la notion |PROBLÈME| d'une manière très générale pour faire référence au problème de physique, ou alors de manière un plus précise |DEUX CHARIOTS LANCÉS HORIZONTALEMENT| ou encore |PARTICULES DE MASSES DIFFÉRENTES PROJETÉES PAR UNE FORCE IDENTIQUE| pour parler comme les physiciens, mais on s'éloigne alors de l'usage que fait Grize des notions primitives [523].

Nous partirons du principe que l'indétermination est réelle, et afin d'éviter au maximum de procéder à des choix arbitraires, j'ai choisi ici pour notion primitive |CONSIGNE|, dans l'idée de représenter un processus de sémantisation effectué par l'élève à partir de l'objet consigne dans son ensemble, à la fois la feuille d'exercice imprimée avec sa mise en page, son contenu verbal et son illustration, et l'objet de pensée, la tâche donnée par l'enseignant [524]. La notion |CONSIGNE| est donc le système de représentations complexe de l'énonciateur des propriétés physiques de l'objet de la consigne (dessin, texte, matériaux à disposition, etc.) pris dans la culture de la classe du laboratoire de physique, "micro-culture" qui permet une certaine interprétation à la fois de la tâche (le travail de l'élève) et des objets et de leurs propriétés (un chariot qui roule sur un plan horizontal n'a pas le même sens en classe de laboratoire de physique que pour un fermier qui y a mis son foin).

523. Cette marge de manœuvre n'est pas un problème du point de vue méthodologique, puisque comme Grize l'écrit lui-même, "nommer" une notion primitive est en soi un abus : cette *notion* est justement pré-langagière. Il faut donc comprendre cette marge de manœuvre dans le nom attribué aux notions primitives comme allant de pair avec la relative indétermination de ces objets que sont les *notions primitives*. Cette indétermination est plus grande dans certains cas, comme ici.

524. Ce choix se justifie facilement du fait que Grize adopte la définition des *notions primitives* de Culioli, à savoir que ce "sont des systèmes de représentations complexes de propriétés physico-culturelles, c'est-à-dire des propriétés d'objets issues de manipulations nécessairement prises à l'intérieur de cultures" (Grize, 1996). Dès lors, il appartient au choix que l'analyste fait en fonction des objectifs de sa recherche, de prendre ces systèmes à une échelle plus ou moins grande. Considérer l'ensemble de la consigne comme système offre l'avantage de ne pas avoir à statuer pendant l'analyse sur les interprétations des élèves sur cet objet complexe qu'est la consigne. Éventuellement, et si nécessaire, cet objet peut se préciser plus tard au cours de l'analyse. En effet, c'est plutôt à partir d'une compréhension de l'ensemble d'une schématisation que l'analyste peut, parfois, tirer quelques conclusions sur la manière dont l'objet est perçu en tant que |CONSIGNE|, selon la manière dont il a été interprété et utilisé dans la communication.

À l'intervention n°2

La référence à la consigne se précise dans cette intervention, et j'ai pu identifier deux notions primitives plus spécifiques relatives à la consigne de l'item #4 : le |CHARIOT|, qui est l'objet auquel se rapporte {le fait que ce soit plus léger} tant au niveau de la consigne verbale que de son illustration, et l'action d'|ARRIVER LE PREMIER À LA LIGNE D'ARRIVÉE A| d'où est extrait le prédicat $\pm$être $pareil$. J'aurais pu analyser une opération d'extraction ι de la classe-objet {le fait que ce soit plus léger} à partir d'une propriété {plus léger} ou d'un prédicat $\pm$être $plus\ léger$ qui qualifie l'objet |CHARIOT|, mais cette analyse est inutilement compliquée ici, et procède d'une lecture linguistique de l'énoncé. Or, en logique naturelle, l'objectif est de rester au plus près de l'activité sémiotique du locuteur. Ici, la locutrice commence par introduire un objet de discours, à savoir {le fait que ce soit plus léger}, et ce serait extrapoler des opérations qu'elle n'effectue pas, du moins explicitement, que d'aller décomposer cet objet à partir d'un prédicat $\pm$être $plus\ léger$ et d'une autre classe-objet {plus léger}. L'intérêt de la logique naturelle réside justement dans son usage au plus près du discours tels qu'il se construit progressivement.

Ici, cela nous permet de mettre en évidence que la notion de |POIDS|, qui n'apparaît que deux énoncés plus tard dans le dialogue, est amenée dans la conversation des élèves à partir d'une classe-objet assez inattendue :{le fait que ce soit plus léger}, très proche des observations empiriques des élèves (la pesée des voitures), pour laquelle la langue vernaculaire ne dispose d'aucun vocable spécifique. En effet, il est intéressant de constater, ici, que la notion de |POIDS| est introduite dans ce dialogue par {le fait que ce soit plus léger} et non par le biais d'une propriété, *être plus léger* - qui correspondrait à la "préconception" identifiée par la littérature - ni par le biais d'une analyse de la force de gravitation, comme dans le modèle de la physique newtonienne. Considérer que c'est "un fait" est néanmoins conforme à l'activité réelle des élèves - la pesée des voitures - et s'intègre bien au modèle newtonien, pour lequel le *poids* n'est pas une propriété, mais la *force de gravitation* qui s'exerce sur une *masse* : le *poids* d'une *masse* à un moment et dans un lieu particulier apparaît comme un "fait" que l'observateur peur constater à l'aide de ces concepts de la physique classique. La *masse*, elle, est conceptualisée comme la propriété de l'objet, et si elle est utile pour déterminer l'intensité du *poids* lorsque celui-ci ne peut être mesuré directement, elle s'en distingue néanmoins.

Un problème de communication réside cependant dans le fait qu'il n'existe pas dans la langue naturelle un adjectif correspondant à {plus léger} qui ferait référence à la masse comme {plus léger} le fait au poids : il faut employer l'expression alambiquée *de masse moindre*, alors qu'un adjectif comme *moins massif* serait plus pertinent, mais il est inhabituel et a d'autres connotations. Les élèves se retrouvent donc dans la situation d'une référence à la masse comme propriété de l'objet par un qualificatif absent dans la langue courante, d'où ici l'expression composée "le fait que ce soit plus léger". Cette difficulté de langage n'est peut-être pas étrangère à la difficulté rencontrées par les élèves dans l'appropriation du vocabulaire savant de la physique newtonienne. En effet, tout se passe ici dans un ordre logique (naturel) qui part de la perception et va vers l'abstraction : Aurélie perçoit deux chariots ou deux voitures, Aurélie perçoit que l'une des voitures est plus légère au moment de la pesée, puis elle extrait à partir de là {le fait que ce soit plus léger}, le poids ou - nous aurons compris l'indétermination qui subsiste - la masse. Finalement,

cette analyse souligne que l'acquisition du concept de masse a peut-être besoin d'un adjectif spécifique du langage savant pour y faire référence : peut-être qu'Aurélie profite de n'avoir qu'un seul adjectif à disposition et construit {plus léger} pour faire référence de manière indéterminée à la masse et au poids, alors que si le langage le permettait elle aurait pu construire "le moins massif" ou quelque chose comme ça. En suivant cette hypothèse, la classe-objet utilisée par Aurélie, {le fait que ce soit plus léger}, ne fait pas référence à une propriété de l'objet mais constitue plutôt une référence indéterminée au *poids* et à la *masse*, voir à une observation effectuée lors de la leçon ou donnée en consigne, à savoir que les deux chariots n'ont pas la même *masse*.

Aux interventions n°3 et 4

Après avoir demandé une explication à tout le groupe, Aurélie interpelle Sylvie en particulier. Cela peut éventuellement nous renseigner sur le statut de Sylvie dans le groupe : elle est vraisemblablement considérée comme l'experte de physique parmi les trois. Si on se réfère aux notes acquises par les élèves jusque là, Sylvie a effectivement la plus haute moyenne du groupe en physique avec un 5.5 contre un 5.0 pour Aurélie et un 4.3 pour Barbara.

Sylvie, dans sa réponse, émet des doutes sur ses capacités à dire cette connaissance (voir $\sigma_{I.4}$), mais elle fournit néanmoins immédiatement une réponse (voir $\sigma_{I.5}$), et prend entièrement en charge son explication, ce qui apparaît encore plus clairement dans la suite du passage dans la manière dont elle défend cette explication en répétant plusieurs fois les mêmes éléments de sa schématisation (voir notamment $\sigma_{I.26}$ et $\sigma_{I.27}$).

À l'intervention n°5

Sylvie amène des éléments nouveaux à la schématisation à partir de ses représentations du problème [525], notamment par une opération d'élaboration de la classe-objet {le fait que ce soit plus léger} introduite par Aurélie, qu'elle reprend comme {poids}. Cette élaboration constitue, à mon avis, un indice que Sylvie a compris la question d'Aurélie. Sylvie introduit aussi un nouvel objet à la schématisation, {masse}, dans un usage qui en fait d'emblée un objet de discours distinct de {poids}. Autrement dit, l'hypothèse d'une classe-objet indifférenciée {poids, masse} ne résisterait pas à l'analyse, ici, puisque si l'un est "en fonction de" l'autre, les deux objets ne peuvent être identiques. Cette différenciation va au-delà de ce qu'Aurélie schématise à l'intervention n°2 où, comme nous l'avons vu, {le fait que ce soit plus léger} serait cohérent avec une classe-objet indifférenciée {poids, masse}. Cette observation nous met sur la piste d'un contraste intéressant quant aux élaborations et reprises différenciées ou non des objets {poids} et {masse} selon les interlocutrices :

pour Aurélie : {le fait que ce soit plus léger} $\cong$ {poids, masse}
pour Sylvie : {poids}, {masse}.

525. Nous pourrions considérer une opération comme celle-ci comme un indicateur des connaissances de l'élève dans la construction d'une schématisation.

À l'intervention n°6

Barbara prend comme point de départ la possibilité de lâcher les objets, qu'elle a rencontrée dans un autre exercice. La localisation $\lambda_{I.6}$ (là, ...) fait référence à la situation-problème de la chute de l'item #1, et non au $\lambda_{I.1}$ (là, ...) de l'intervention 1, qui fait référence au présent exercice, c'est-à-dire à l'item#4 où les deux chariots sont posés sur une surface horizontale. Nous avons vu que ces deux exercices sont mis en contraste, du point de vue de l'enseignant[526], du fait que la réponse attendue est différente pour ces deux situations-problème : dans l'une (item#1) les deux objets arrivent en même temps au sol, selon le modèle enseigné, alors que dans l'autre (item #4) ce n'est pas le cas. Barbara amène ainsi une contribution importante au dialogue en structurant la schématisation à l'aide de deux opérations de localisation (opérations λ) qui, sur le plan logique, conditionnent la procédure et le raisonnement pour la résolution du problème à l'une ou l'autre de ces deux localisations. Autrement dit, l'intervention de Barbara structure la schématisation en réflexion *relative à une localisation ($\lambda_{I.1}$ ou $\lambda_{I.6}$)* plutôt qu'à une réflexion générale à partir du modèle enseigné. Cette structure est reprise, en tant que structure, par les autres interlocutrices tout au long de la conversation, quand bien même elle est impliquée dans le désaccord au niveau des contenus.

Barbara amène également un élément de savoir, directement reconnaissable dans le cours théorique, à savoir ($-$, que le poids être exercé sur), ce qui peut nous faire penser que Barbara sait que le poids est une force. En effet, la définition de la force inclut explicitement le schème d'action externe *être exercé sur*, et l'expression langagière est assez peu courante par ailleurs. Néanmoins, cet énoncé illustre également une accommodation très personnelle de ce schème d'action par Barbara, qui introduit le prédicat $\pm$*être exercé sur rien du tout*[527], qui ne serait sans doute pas acceptée par un physicien telle quelle. En effet, l'expression elle-même constitue un oxymoron, du fait que la force newtonienne justement n'existe que du moment qu'elle est exercée *sur quelque chose* : la force n'existe jamais en tant que potentiel, il s'agit alors d'inertie, de quantité de mouvement ou encore d'énergie potentielle, mais pas de force.

Aux interventions n°7 et 8

Aurélie réagit à l'intervention de Barbara par la sémantisation d'un prédicat $\pm$*être la même chose*, qui reste très implicite et difficilement compréhensible. Elle précise ensuite sa pensée dans l'énoncé suivant, avec l'expression suivante : "attire toujours en fonction de la masse mais à la même vitesse". Le "même" de "même chose" s'applique alors à la vitesse. Ces interventions de Sylvie semblent à nouveau être ancrées dans sa représentation du poids, son concept de poids et ses relations à la masse. Elle en extrait le prédicat $\pm$*être la même chose*, dont nous savons par ailleurs que c'est un prédicat que l'enseignant a beaucoup

526. Pour plus de détails, voir l'analyse du point de vue de l'enseignant sur l'item #4, p. 535 et suivantes.

527. Par soucis de simplification, j'ai choisi de traiter $\pm$*être exercé sur rien du tout* comme un prédicat spécifique, sans l'analyser en séparant $\pm$*être exercé sur* et la classe-objet {rien du tout}, mais cette analyse plus détaillée revient pratiquement aux mêmes conclusions. Au lieu de parler de l'accommodation du schème d'action du poids $\pm$*être exercé sur* en $\pm$*être exercé sur rien du tout*, l'usage créatif de Barbara dans cette intervention serait analysé en posant la question des objets acceptables, pour le modèle enseigné, aux places libres de $\pm$*être exercé sur* (•, •).

utilisé dans ses discours, notamment à l'occasion de la qualification de l'accélération des objets en chute libre comme constante[528] (g).

L'idée de constante est reprise par Sylvie avec le même prédicat $\pm$être *la même chose*, mais l'accélération est devenue une "vitesse", ce qui constitue une simplification acceptable dans la résolution des items #1 et #4, étant donné qu'une accélération identique mène à une vitesse identique dans ces cas-là, mais peut néanmoins poser problème au niveau conceptuel.

Sur le plan de l'enchaînement conversationnel, les interventions de Sylvie (I_7 et I_8) constituent une explication alternative à celle de Barbara (I_6), qui entre en compétition avec celle-ci. En effet, la double localisation proposée par Barbara pour trancher la question est contredite par l'énoncé de Sylvie ($\sigma_{I.7}$) que le "poids c'est toujours la même chose". Sylvie conteste la pertinence de localiser le problème, et oriente son argumentation sur le fait que le concept demeure invariant, quel que soit la situation-problème dans laquelle il est utilisé (item #1 ou item #4). Le partage dans le dialogue est relativement limité, puisque Sylvie ne fait pas de reprise des termes utilisés par Barbara : elle aurait pu ici construire à partir du prédicat de Barbara $\pm$être *exercé sur*, qui est par ailleurs l'expression consacrée de la discipline. Cette décentration lui aurait peut-être valu plus de succès.

Aux interventions n°9 à 12

Barbara répond à l'opposition de Sylvie en élaborant davantage sa schématisation, mais elle ne fait pas non plus de reprise du discours de Sylvie. Elle poursuit avec la structure qui articule une double localisation, en élaborant le prédicat $\pm$être *exercé sur rien du tout* en $\pm$être *exercé sur aucun objet*. Ce qui paraissait un prédicat contradictoire, un oxymoron, se précise : la force dont il est question est plutôt la *somme des forces*, puisque Barbara oppose $\pm$être *exercé sur aucun objet* à $\pm$être *exercé sur la table* ($\upsilon_{I.9}$), c'est-à-dire la situation où la somme des forces n'est pas nulle car il n'y a pas de force qui s'exerce dans la même direction, en sens inverse et à la même intensité que la gravitation, à la situation où la force qu'est le poids est annulée par une force de soutien. Selon cette interprétation, c'est donc la *somme des forces* exercées sur l'objet qui est nulle, et non l'intensité du *poids* elle-même, dans le prédicat de Barbara $\pm$être *exercé sur rien du tout*. Cette interprétation redonne non seulement une cohérence au point de vue de Barbara, mais permet également de montrer que sa réflexion est proche, voire semblable, au modèle enseigné, quoique discursivement maladroite.

Dans la schématisation de Barbara, il y a deux cas de figure, "là$_2$" (I_6) et "là$_1$" (I_12), pour lesquels le poids joue un rôle différent : pour l'item #1 où les deux objets arrivent en même temps au sol, "là$_2$" (I_6), le poids "est exercé sur rien du tout" et "on n'en tient pas compte" ; alors que pour l'item #4 où les deux objets n'arrivent pas en même temps à la ligne d'arrivée, "là$_1$" (I_12), le poids "est exercé sur la table" et il faut en tenir compte.

528. Pour plus de détails, voir l'analyse du point de vue de l'enseignant sur l'item #1, section 6.3.3.1, p. 415 et suivantes.

À l'intervention n°11 la schématisation de Barbara opère un changement de niveau : elle ne porte plus sur l'explication physique, mais sur la stratégie de résolution du problème. C'est l'opération $\eta_{I.11}$, qui introduit le prédicat $\pm tenir\ compte$, qui opère ce changement de niveau, passant d'une résolution *cognitive* du problème à une résolution *métacognitive*, une stratégie de résolution de problème. L'introduction de ce prédicat, s'il peut paraître ordinaire aux élèves, ne se rattache pas au contexte immédiat du dialogue mais fait référence à une question implicite : faut-il tenir compte du poids dans ce problème ? Ce changement du niveau de discours se remarque également par le fait que le sujet de l'action dans l'énonciation $\sigma_{I.11}$ est indéfini ("on"), et ne fait pas référence aux objets physiques mais aux *sujets*, aux élèves qui doivent résoudre la situation-problème de physique. La conclusion de Barbara indique qu'elle comprend la tâche donnée par l'enseignant comme étant un problème où il s'agit de décider s'il faut tenir compte du poids ou non. En effet, la principale caractéristique des objets présents dans ces exercices est le poids, et les situations-problème diffèrent principalement sur le fait que les objets en mouvement sont une fois en chute (libre), et une autre fois sur une surface horizontale. Ainsi, cet intervention de Barbara concerne la procédure à mettre en œuvre pour répondre au problème, et n'est plus au sujet du référent de la notion $|\text{POIDS}|$.

À l'intervention n°13

Aurélie, qui est la destinataire des explications de Barbara et Sylvie, met un terme à la compétition entre les explications de Barbara et Sylvie en déclarant ne rien y comprendre. L'effet conversationnel de ce constat d'échec est de relancer la schématisation d'une explication, en particulier de la part de Sylvie. Cette intervention est un pivot de la conversation, à partir duquel Barbara reste en retrait et Aurélie intervient davantage, et change de posture : elle n'est plus seulement la destinataire des explications, mais se pose en contradictrice dans la construction d'une schématisation commune. Un autre fait intéressant à constater, c'est l'adaptation du discours de Sylvie, à partir de ce moment pivot, à ce qui a été dit auparavant : elle reprend la structure en double localisation de Barbara et cherche également une version commune, notamment au niveau des prédicats utilisés, entre les explications jusque là plutôt concurrentes.

Aux interventions n°14 et 15

Sylvie tente une synthèse de ce qu'elle a dit jusque là, en mélangeant son prédicat $\pm dépendre\ en\ fonction\ de$ repris de son premier énoncé explicatif (I_5), et la double localisation de Barbara : là$_1$ (I_{14}) et là$_2$ (I_{15}). Il est également remarquable que Sylvie n'utilise plus {masse} qu'elle a tenté d'introduire préalablement, mais uniquement la classe-objet {poids}, qu'elle élabore par une opération sur les faisceaux moins ambitieuse que l'introduction de {masse} mais allant dans le même sens : {le poids de ce qui est attiré à la terre}. Au niveau du référent de cet objet de discours, l'opération n'apporte rien de nouveau, puisque c'est un synonyme de {le fait que ce soit plus léger, poids}. Par contre, au niveau de la co-construction de la schématisation, l'opération sur les faisceaux $\gamma_{I.14}$ permet à Sylvie d'amener un contenu qu'elle juge indispensable à son explication (voir aussi à ce sujet les répétitions de $\sigma_{I.26}$ et $\sigma_{I.27}$), à savoir que le "poids" est "le poids de ce qui est attiré à la terre", la partie "ce qui est attiré à la terre" correspondant

évidemment à la {masse}. Autrement dit, elle réintroduit avec subtilité la distinction entre {masse} et {poids} qui, de son point de vue, permet d'expliquer le fait que la vitesse des objets en chute libre est la même indépendamment de la masse, cette vitesse étant la conséquence non pas de la force exercée *par* le poids - qui est différente pour des objets de masses différentes-, mais de la force *à l'origine du* poids, à savoir la force de gravitation exercée par la Terre, qui est identique pour tous les objets à la surface de la Terre. Cette subtile adaptation de Sylvie à la schématisation de Barbara m'invite à postuler une opération implicite d'élaboration de la classe-objet {masse}, pour plus de clarté :

$\gamma_{I.14.1}$ **:** [{masse} ⇒ {masse, ce qui est attiré à la terre}]

Cette opération implicite permet à Sylvie de momentanément surmonter l'usage indifférencié de "poids" et "masse" de Barbara, avec qui elle est d'accord sur le fond, en schématisant une expression intermédiaire intéressante, à savoir le "poids [de la masse]", qui évoque tout le processus de calcul de l'intensité d'une force (le *poids*) exercée dans une direction et un sens particulier, à partir de la propriété d'un objet (la *masse*), en particulier lorsque l'on considère des masses différentes[529]. Finalement, par son nouveau mélange, Sylvie schématise son explication antécédente, à savoir que le poids "attire toujours en fonction de la masse mais à la même vitesse", comme traitant du cas qui "est en fonction du poids" (là$_2$, la chute libre) alors que dans l'exercice en cours (là$_1$, avec les chariots sur le plan horizontal) "ça ne dépend pas en fonction du poids de ce qui est attiré à la terre". Autrement dit, elle peut ainsi réitérer l'idée que dans la situation de chute libre les "masses" - et non le "poids" - n'ont aucun effet sur la vitesse, alors que dans la situation des chariots à l'horizontale les "masses" ont un effet sur la vitesse. Il s'agit d'une schématisation désormais cohérente avec celle fournie par Barbara aux interventions n°6, et n°9-12.

À l'intervention n°16

Barbara confirme reconnaître la convergence de son explication avec la schématisation de Sylvie des interventions n°14 et 15. La reprise par Sylvie d'une configuration similaire à la sienne joue certainement un rôle dans cette reconnaissance : $\tau \Rightarrow d_{14} \xrightarrow{alors_que} d_{15}$ ressemble à la configuration utilisée par Barbara $\tau \Rightarrow d_{9-11} \xrightarrow{alors_que} d_{12}$. L'expression de Sylvie "c'est en fonction du poids" semble avoir été considérée par Barbara comme équivalente ou menant à la même conclusion que "on en tient pas compte".

La divergence entre les deux élèves quant à la situation de l'item #1, à ce point de la construction de la schématisation, a ainsi pu être éclaircie de leurs points de vue (mais pas de celui d'Aurélie, comme nous le verrons ensuite) :

pour Barbara :	on ne tient pas compte du poids
pour Sylvie :	la vitesse ne dépend pas de la masse.

529. Cette analyse fait émerger les limites du langage, lorsqu'il force la pensée d'un processus à prendre le statut épistémologique d'un *objet* de discours, qui fait disparaître les opérations successives permettant sa construction, comme si la classe-objet constituait une axiomatisation miniature de l'expérience vécue, qui est elle-même génétique, processuelle etc. et se résume fort mal à l'aide d'un seul mot, qui porte l'illusion d'une unité et d'une généralité

À l'intervention n°17

Sylvie fournit un argument en soutien à la localisation de Barbara, qu'elle a reprise à sa charge, qui consiste à expliquer le fait que "c'est en fonction du poids" dans la situation à l'horizontale en raison justement du plan horizontal. Sylvie fait notamment un mouvement de la main le long de la table quand elle dit "en longueur".

Aux interventions n°18 et 19

Aurélie intervient pour la première fois dans l'explication avec ces deux énoncés, ce qui peut sans doute être interprété comme le fait qu'elle a désormais compris quelque chose, depuis son aveu de "ne rien piger" à l'intervention n°13. Elle reprend la configuration qui contraste les deux situations de Barbara, et le prédicat de Sylvie $\pm$être en $fonction$ de ($\eta_{I.5}$), mais inverse les déictiques. Cette inversion peut s'expliquer par le fait qu'Aurélie a vraisemblablement compris l'explication de Barbara quant au fait que dans le cas de chute (libre) le poids "est exercé sur rien du tout" (I_6), mais n'a pas compris la conséquence stratégique qu'en tire Barbara, à savoir qu'il ne "faut pas tenir compte [du poids]". En effet, Aurélie ne semble pas avoir compris que le poids est une force, et qu'une force n'existe que lorsqu'elle s'exerce sur quelque chose, élément du savoir de Barbara (et Sylvie), qui est effectivement directement instruit de la connaissance enseignée et paraît plutôt contre-intuitif au vu du sens commun. Dès lors, Aurélie comprend l'expression de Sylvie "c'est en fonction du poids" de manière fort différente de ses deux camarades, probablement sous la forme d'un poids libre d'obstacle agissant lors d'une chute libre, par opposition à un poids entravé, retenu par la table, lors du mouvement à l'horizontale, alors que Barbara et Sylvie font plutôt référence à la *somme des forces* qu'à la *valeur de la force* "poids" exercée sur l'objet, mais sans jamais l'expliciter.

Aux interventions n°20 et 21

Ces interventions amènent un indice supplémentaire en faveur de l'hypothèse d'une opération implicite $\gamma_{I.14.1}$ (voir ci-dessus) pour reconstruire le point de vue de Sylvie, lorsqu'elle dit "poids de ce qui est attiré à la terre". Sans cette hypothèse, on ne parvient pas à comprendre le fait que Sylvie dans cet énoncé corrige non pas la localisation d'Aurélie, inversée par rapport à la sienne, mais ses déterminations $d_{I.18}$ et $d_{I.19}$, en suggérant de remplacer le prédicat $\pm$être en $fonction$ du $poids$ par $\pm$être en $fonction$ de la $masse$. Pour Sylvie, cette correction est équivalente à l'inversion des déictiques des localisations. Examinons dans le détail ce que nous donne cette reconstruction.

Du point de vue de Sylvie, le "poids" est une *force* qui attire les objets "à la même vitesse", ce qui lui fait comprendre le prédicat utilisé par Aurélie $\pm$être en $fonction$ du $poids$ comme impliquant que les objets arrivent en même temps. Ce premier sens de *poids* est un sens général, équivalent à *la force de gravitation exercée par la Terre sur tous les objets à sa surface*. Au niveau du modèle mathématique, c'est un *poids* qui fait référence à la loi de gravitation universelle ($\frac{G \cdot m \cdot M}{r^2}$) pour tout objet à la surface de la Terre, où M est définie (c'est la masse de la Terre) et m demeure une variable. Le "poids" est conçu

par Sylvie comme *un poids en général*, et non comme *le poids particulier d'un objet*, comme le terme s'utilise au quotidien lorsque l'on pose la question "quel est le poids de cet objet ?". C'est pourquoi elle introduit à un moment donné de la conversation ($\gamma_{I.14}$) la spécification de cette généralité avec les mots : "poids de ce qui est attiré à la terre", qui vient justement spécifier la référence à un *poids particulier*, celui d'une *masse singulière* (éventuellement dans un lieu et à un moment spécifique). Auparavant, Sylvie utilise "poids" comme un concept général, ce que je pourrais paraphraser comme "la force qui s'exerce sur tous les objets attiré par la Terre".

Or, du point de vue d'Aurélie, le *poids* est spécifique à un objet, ce qui lui fait comprendre le prédicat $\pm$*être en fonction du poids* comme une prise en compte de la *masse* de l'objet pour déterminer son accélération et, partant, sa vitesse de chute. Du point de vue d'Aurélie, le *poids* définit, au niveau du modèle mathématique, la force de gravitation universelle ($\frac{G \cdot m \cdot M}{r^2}$) appliqué à un objet en particulier à la surface de la Terre, c'est-à-dire où M et m sont définies (respectivement, la masse de la Terre et la masse de l'objet considéré). Autrement dit c'est *le poids particulier d'un objet*, et dans ce sens de *poids*, {poids} contient la {masse} considérée, ce qui conduit assez naturellement à un usage indifférencié {poids, masse}. En effet, les classes méréologiques de la logique naturelle peuvent contenir, et contiennent fréquemment, des tout et des parties dans leurs composants, sans effectuer de distinction hiérarchique. Cette propriété des classes méréologiques a précisément été choisie pour représenter le fonctionnement de la langue naturelle. Ici, j'ai l'opportunité de montrer que cette particularité permet d'éclaircir, également, le fonctionnement de la pensée naturelle à l'aide de la langue naturelle ou, devrais-je dire, *naturalisée* par Barbara à partir d'un langage technique de la physique qu'elle est en train de s'approprier.

La réflexion de Barbara "colle" au fait que la classe-objet {poids}, dans le sens d'un *poids particulier d'un objet*, contient la masse de l'objet comme l'un de ses faisceaux (via la formule de gravitation universelle *appliquée* à l'objet), ce qui ne permet pas vraiment de juger erronées des expressions courantes comme "quel est le poids de cet objet ?", quand bien même il est plus précis de dire, conformément au modèle de la physique de Newton, "quelle est la masse de cet objet ?".

Aux interventions n°22, 26 et 27

Sylvie essaie encore sans grand succès d'expliquer que la masse et le poids sont deux choses différentes, et elle tente une définition (I_{22}) qui reprend ce qu'elle avait déjà dit sous forme de prédicat ($\pm$*attirer en fonction de*) en élaborant la classe-objet {poids}, y ajoutant {ce qui attire à la terre}, qu'elle distingue de {le fait que ce soit plus léger, masse} alors que ses camarades semblent indistinctement construire une classe-objet {le fait que ce soit plus léger, poids, masse} dans le dialogue.

Aux interventions n°23, 24, 25, 29, 30 et 31

Sylvie exprime son sentiment d'être face à un désaccord, probablement en raison de l'expression non-verbale d'Aurélie, et Aurélie répond par une méta-communication précisant la prise en charge de son énoncé ($\mu_{I.25}$) comme n'étant qu'un problème de compréhension, et non d'adhésion. On peut s'étonner

du manque de patience d'Aurélie, mais il convient de mentionner que relativement au contexte scolaire étudié, les explications schématisées par Barbara et Sylvie, et cette conversation explicative entre pairs est déjà exceptionnelle par sa longueur.

Aux interventions n°28, 32, 33 et 34

Aurélie renonce à comprendre, et transmet à Sylvie le crayon et le rapport, effectuant ainsi une passation du droit d'écrire, qui est l'un des instruments de l'exercice du pouvoir au sein du groupe. Sylvie tente de reprendre la conversation, et propose d'appeler l'enseignant. Elle interprète le renoncement d'Aurélie comme un désaccord et non comme une difficulté de compréhension. Comme je l'ai observé dans les autres situations de malentendu, à l'occasion d'échanges avec l'enseignant, la difficulté inhérente aux processus de communication n'est pas prise en compte par les élèves dans leurs échanges entre elles : elles font comme si le désaccord était *forcément* sur le fond, sans envisager qu'il puisse être sur la forme.

Synthèse du cheminement précédant l'incident critique

Initiée par la question d'Aurélie ($\tau_{I.2}$), la schématisation des élèves a pour finalité de construire cette relation mystérieuse ($-$ que ?) $\xrightarrow{pourquoi}$ ([là$_1$], au final, $-$que le fait que ce soit plus léger [ne] pas être pareil). La première proposition est schématisée par Sylvie, et structure l'ensemble de la conversation autour du prédicat $\pm$être en $fonction$ de, prédicat décliné dans d'autres variantes par la suite. Sylvie élabore également la classe-objet {le fait que ce soit plus léger, poids} en {le fait que ce soit plus léger, poids}. En reprenant l'essentiel de ce qui est présenté dans le tableau 6.3 (p. 575), on peut constater que les élèves ne s'entendent pas sur ce point. Cependant, elles ne sont pas forcément en désaccord *sur le fond*, puisque, comme nous l'avons vu à l'occasion de l'intervention n°16, les variantes de Barbara et Sylvie sont compatibles. Il s'agit plutôt de perspectives qui ne parviennent pas à trouver une expression partagée, commune. Je vais examiner l'hypothèse d'une situation de malentendu. La reconstruction de la conversation effectuée permet déjà de constater que, si malentendu il y a, celui-ci n'est pas résolu par les élèves. Il est éventuellement identifié par Sylvie qui énonce (I_{23} : "vas demander au prof si tu me crois pas"), mais cette interprétation est contestée par Aurélie (I_{25} : "moi je comprends pas c'est tout !"). En tout cas, les énoncés des interlocutrices ne nous fournissent pas directement la clef de l'interprétation d'un éventuel désaccord. Nous disposons néanmoins de suffisamment d'indices pour mener notre enquête analytique en posant des hypothèses.

La reconstruction du cheminement du groupe au fil de la conversation, effectuée ci-dessus, donne un aperçu de la manière dont se déroule la conversation au fil du temps, et comment se construisent progressivement des schématisations par l'une ou l'autre des trois élèves pour expliquer leur réponse dans le rapport expérimental au sujet de l'item #4. À présent se pose la question de la co-construction de cette schématisation : est-elle complètement partagée, et sinon quels sont les opérations logico-discursives partagées et celles sur lesquelles les interlocuteurs divergent ? L'analyse séquentielle ci-dessus permet de poser une hypothèse sur un élément pour lequel les interlocuteurs procèdent à des opérations divergente :

la classe-objet {poids} et les opérations qui en font usage. Afin d'examiner plus systématiquement s'il y a situation de malentendu sur cet objet de discours, je vais procéder dans la section suivante à l'enquête analytique en comparant les points de vue des trois élèves sur cet objet de discours.

6.6.4 Enquête quant à une situation de malentendu

6.6.4.1 Travail préparatoire à l'enquête

Un préambule méthodologique s'impose. Je souhaite revenir sur les conséquences méthodologiques de la définition de la schématisation comme étant à la fois un processus, et un résultat. En tant que résultat, les opérations logico-discursives mises en œuvre par les locuteurs peuvent parfois nous renseigner sur les représentations des locuteurs à un moment donné. Par exemple lorsqu'un nouvel objet de discours est introduit, il semble probable que son ancrage repose soit sur un élément de la situation d'interlocution (consigne, objets présents sous les yeux, etc.), soit sur les connaissances du locuteur. Néanmoins, il s'agit de toujours considérer ces indices comme émergeant d'une schématisation qui se construit progressivement, se réajuste, se corrige, se complète, etc., du fait qu'elle est constituée à l'occasion de la situation de communication, voire *par* les échanges effectués [530]. Par conséquent, lorsque je proposerai des hypothèses sur les représentations des élèves à l'occasion de cette enquête analytique, ces hypothèses ne portent que sur la situation d'interlocution analysée, et ne prétend pas que les élèves soient arrivées à l'école avec ces représentations en tête : c'est peut-être au fil de l'échange avec leurs pairs que leurs représentations se sont construites. Mes hypothèses sur ces représentations reposant sur l'analyse du processus logico-discursif de construction et je ne suis pas en mesure de distinguer l'un de l'autre.

Le classement des opérations selon les locutrices, dans le tableau ci-dessous, ne signifie pas donc pas que j'attribue sans discussion le contenu de la ligne correspondante aux élèves concernés. Puisqu'il s'agit de mener une enquête sur une possible situation de malentendu, il est nécessaire de faire cette classification individuelle, même si, du point de vue de l'apprentissage et des connaissances des élèves, je ne suis pas en mesure d'attribuer des connaissances individuellement aux élèves pour la majeure partie de ces opérations. En effet, seules quelques opérations amenant de nouveaux éléments sont susceptibles de nous renseigner sur les divergences entre élèves.

Dans le tableau 6.4 ci-dessous (p. 588), je reprends pour chaque interlocutrice uniquement le résultat des opérations [531] opérant sur la classe-objet {poids} en incluant les prédicats qui reprennent cette classe-objet {poids} à l'une de leur place (•), comme $\pm exercer\ sur$, ou qui participent à la définir, comme $\pm$être $fonction\ de$. Les résultats des opérations de construction des classe-objets ont la mention entre

530. Dans ce cas, si cette démarche permet de faire des hypothèses, parfois, sur les représentations individuelles ou collectives à partir des échanges, il faut néanmoins renoncer à attribuer ces représentations aux interlocuteurs antérieurement à l'échange, car il est toujours possible que la construction logico-discursive soit concomitante de la représentation, voire qu'elle nous fournit l'indice de sa construction en situation, dans le sens où la représentation résulte de la situation de communication.

531. J'ai pris en compte toutes les opérations, à l'exception des opérations σ prise en compte dans l'attribution d'une locutrice aux opérations, et des opérations τ qui ne nous apportent pas tellement d'indice dans cette situation. Ces choix sont partiellement arbitraires, parce qu'ils visent un *modus operandi* dans un équilibre optimum entre le niveau de détail permettant de contraster les points de vue des interlocutrices et la plus grande simplicité dans la présentation.

parenthèse des opérations, p.ex. "(α)", de manière à pouvoir se rendre compte s'il s'agit d'une reprise (θ), d'une élaboration (γ, ι, etc.) ou d'autre chose. Les usages des prédicats sont donnés entre parenthèses, spécifiant les places libres, par exemple $\pm\hat{e}tre\ pareil$ (•, •) est utilisé par Aurélie à l'intervention 2 $\pm\hat{e}tre\ pareil$ ({le fait que ce soit plus léger}). Souvent, les objets qui remplissent ces places sont implicites[532], dans les traces analysées. Je me baserai sur les arguments et détails présentés dans la section précédente pour reconstruire ces implicites, que j'exprimerai en référence aux concepts de physique du modèle enseigné (vitesse, force, etc.) de manière à rendre les points de vue des élèves plus intelligibles. Chaque fois que c'est possible, et de manière plus ou moins précise, je vais procéder comme si les élèves raisonnaient toutes conformément au modèle enseigné[533]. Cela permet de mettre en évidence leurs usages divergents des objets de discours et prédicats, de telle sorte qu'elles ne se comprennent pas.

		Produit de la schématisation de {poids}	Produit utilisant {poids} dans la schématisation
Aurélie	I_2	{le fait que ce soit plus léger} (α)	{le fait que ce soit plus léger} $\mapsto$[534] $\pm\hat{e}tre\ pareil$ (•)
	I_{18-9}	{poids} (θ) {ça$_3$, [le fait que ce soit plus léger être pareil]} (θ)	{ça$_3$}, {poids} $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ (•, •)
Barbara	I_6	{poids} (θ)	{poids}, $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ exercé\ sur\ rien\ du\ tout$ (•)
	I_9	{poids} (θ)	{poids}, $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ exercé\ sur\ aucun\ objet$ (•)
	I_{10}	{poids} (θ)	{poids}, $\mapsto$ $\pm tomber\ directement$ (•)
	I_{11}	{poids} (θ)	{on}, {poids}, $\mapsto$ $\pm tenir\ compte$ (•, •)
	I_{12}	{poids} (θ)	{poids}, $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ exercé\ sur\ la\ table$ (•)
Sylvie	I_5	{poids} (α) {masse} (α)	{poids}, {masse} $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ (•, •)
	I_7	{poids} (θ)	{poids} $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ toujours\ la\ même\ chose$ (•)
	I_8	{poids} (θ) {masse} (θ)	{poids}, {masse} $\mapsto$ $\pm attirer\ toujours\ en\ fonction\ de\ mais$ à $la\ même\ vitesse$ (•,•)
	I_{14}	{poids de ce qui est attiré à la terre} (γ) {ça$_3$, [le fait que ce soit plus léger être pareil]} (θ)	{ça$_3$}, {poids de ce qui est attiré à la terre} $\mapsto$ $\pm dépendre\ en\ fonction\ de$ (•, •)
	I_{15}	{poids} (θ) {ça$_3$, [le fait que ce soit plus léger être pareil]} (θ)	{ça$_3$}, {poids} $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ (•, •)
	I_{20}	{masse} (θ) {[ça$_3$, le fait que ce soit plus léger être pareil]} (θ)	{ça$_3$}, {masse} $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ (•, •)
	I_{21}	{masse} (θ) {poids} (θ)	{masse}, {poids} $\mapsto$ $\pm\hat{e}tre\ la\ même\ chose$ (•, •)
	I_{22}	{poids} (θ) {ce qui attire à la terre} (ι)	

532. L'implicite est marqué par les crochets, "[implicite]", comme ailleurs dans le document.

533. Cette manière de procéder reprend, à un échelon micro et pour la question des multiples interprétations possibles d'un discours, le raisonnement scientifique *par hypothèse*, aussi pratiqué en mathématiques dans les démonstrations par l'absurde : en procédant rigoureusement *comme si* selon une hypothèse précise, on se donne les moyens de l'infirmer si d'aventure elle nous conduit à une contradiction. Dans ce cas seulement, je considérerai que les élèves ont une conception différente de la physique que celle attendue par l'enseignant. Si, au contraire, elle permet de redonner de la cohérence à un discours difficilement intelligible, j'en conclus que l'hypothèse demeure probable, jusqu'à preuve du contraire.

534. La flèche $\mapsto$ signifie ici que l'objet est injecté dans le prédicat, de manière analogique à la manière dont une valeur x est injecté dans une fonction $F(x)$ en mathématique, comme le suggère Grize (1996) tout en précisant les différences entre logique naturelle et logique formelle.

		Produit de la schématisation de {poids}	Produit utilisant {poids} dans la schématisation
	I_{26}	{masse} (θ) {poids} (θ)	{poids}, {masse} $\mapsto \pm \hat{e}tre\ la\ m\hat{e}me\ chose$ (•, •)
	I_{27}	{masse} (θ) {poids} (θ)	{poids}, {masse} $\mapsto \pm \hat{e}tre\ \acute{e}gal$ à (•, •)

TABLE 6.4 – Schématisations du poids selon les interlocutrices.

Ce tableau permet de poser des hypothèses quant aux sens que prend "poids" selon les points de vue à partir des contributions faites par chacune d'elles à la conversation. Il met également en évidence la nécessité de faire de telles hypothèses, en montrant combien il est difficile aux élèves d'associer, dans leurs expressions, les objets et les prédicats adéquats les uns aux autres : le "poids" ne "tombe" pourtant jamais, n'en déplaise à Barbara, un "fait" ne peut "être pareil" sans préciser avec quoi, n'en déplaise à Aurélie, et "dépendre en fonction de" est tout bonnement redondant, n'en déplaise à Sylvie qui adopte cette expression sans doute pour mieux se faire entendre de ses camarades. Je chercherai ci-dessous à préciser notamment si la classe-objet {poids} est utilisée comme la propriété d'un objet, ou comme le terme d'une relation avec autre chose, c'est-à-dire comme un concept, selon les points de vue.

6.6.4.2 Première hypothèse : *le cheminement métacognitif de Barbara est interprété par Aurélie comme un cheminement cognitif*

À partir du tableau 6.4, il s'agit de mettre en évidence les éventuelles divergences dans les points de vue des interlocutrices. Je vais procéder par questions. La première question à traiter est celle que soulève Sylvie lorsqu'elle hausse le ton : les élèves schématisent-elles deux classes-objets {masse} et {poids} ou une seule {masse, poids} ?

La classe-objet amenée par Aurélie, à savoir {le fait que ce soit plus léger}, permettrait les deux hypothèses. Aurélie ne semble cependant pas comprendre la distinction que lui propose explicitement Sylvie et, surtout, elle demande une explication à la réponse donnée à l'item #4 dont elle n'aurait vraisemblablement pas besoin si elle faisait la distinction entre {masse} et {poids}. Je considère donc qu'elle utilise plutôt une classe objet indifférenciée {le fait que ce soit plus léger, [masse], [poids]} (voir aussi le commentaire à l'intervention n°5, ci-dessus). Pour Barbara, l'objet de discours {poids} est l'occasion d'une série de prédicats qui nous renseignent sur le sens qu'elle lui donne. Les prédicats indique la référence à une force, mais $\pm tomber\ directement$ fait plutôt référence à une masse. Dès lors, l'hypothèse d'une classe-objet indifférenciée {masse, poids} me semble plus probable. Sylvie les distingue très explicitement. Voici, en synthèse, la réponse à cette question :

Aurélie : {le fait que ce soit plus léger, [masse], [poids]}

Barbara : {[masse], poids}

Sylvie : {masse}, {poids}

Les difficultés que pose la différenciation précise entre {masse} et {poids} soulève une autre question : que signifie {poids} pour ces trois élèves ? Nous avons vu qu'il était possible de faire la différence entre *le poids en général*, une force active dans l'Univers, et *le poids d'un objet particulier*, tel qu'on le mesure sur la balance, ce qui se distingue dans l'expression mathématique de la loi de la force de gravitation par selon que la masse m est laissée sous forme de variable ou spécifiée, en *appliquant* la formule à des objets précis.

Commençant par Sylvie, qui nous fournit une définition du *poids* : "c'est ce qui attire à la terre". Pour Sylvie, le poids est la force de gravitation universelle exercée par la Terre, c'est-à-dire précisément avec M définie comme étant la masse de la Terre. Il s'agit d'une définition générale (au sens où m reste une variable indéfinie), qui explique qu'elle énonce des généralités qui ne concernent pas directement la réponse à l'item #4, comme "le poids c'est toujours la même chose", ou encore "il attire toujours en fonction de la masse mais à la même vitesse".

Pour Barbara, le *poids* fait l'objet de nombreux prédicats, notamment $\pm \hat{e}tre\ exercé\ sur$ qui donne un indice qu'elle dispose du concept de *poids* en tant que *force*. Néanmoins, elle mélange également ce schème d'action du faisceau du *poids*, qui fait référence au concept de *force*, avec le "poids" comme propriété d'un objet (la *masse*), lorsqu'elle utilise {poids} à la place active du prédicat $\pm tomber\ directement$, et avec une réflexion stratégique lorsqu'elle aborde le "poids" comme un objet dont il s'agit de décider s'il faut, dans cette situation-problème, en $\pm tenir\ compte$.

Le sens que prend {poids} pour Aurélie est difficile à interpréter, du fait qu'elle n'en parle pas beaucoup. De la reconstruction de son point de vue, on sait néanmoins que :

— son objet de discours explicite {le fait que ce soit plus léger} peut tout aussi bien faire référence à la consigne, à la masse ou au poids, ou au tout indifféremment ;

— elle *accepte*[535] une explication selon la structure que propose Barbara, c'est-à-dire selon une double localisation, puisqu'elle la reprend à son compte (I_{18-9}) ;

— elle considère l'item #1 "en fonction du poids", et l'item #4 "pas en fonction du poids" (contrairement à Barbara).

Une hypothèse plausible consisterait à ce qu'Aurélie considère le *poids* en fonction de la direction du mouvement des objets : dans l'item #1, comme les objets chutent, le "poids" serait important, alors que dans l'item #4, comme les objets sont retenus par le sol (ou "la table" selon l'expression de Barbara), le "poids" ne serait pas important. C'est peut-être ce qu'Aurélie a retenu de l'explication de Barbara, quand bien même Barbara n'y reconnaîtrait pas sa schématisation, puisqu'elle aboutit à la conclusion inverse (c'est pour l'item #4 qu'il faut "tenir compte [du poids]". Aurélie a peut-être interprété conceptuellement - ou autrement dit sur le plan cognitif - les énoncés que Barbara effectue en tant que stratégie de résolution de problème - sur le plan métacognitif : il s'agirait alors d'une situation de malentendu entre les deux élèves.

535. C'est-à-dire qu'elle comprend et considère convaincante une explication de ce type.

6.6.4.3 Deuxième hypothèse : *des usages de {poids} plus ou moins généraux* versus *particuliers*

Cette "deuxième hypothèse" répond à une autre question que la première, et n'est donc pas en concurrence avec la première. Elle n'est "deuxième" qu'au sens où elle suit et, éventuellement, complète la première.

Finalement, la troisième et dernière question porte sur la finalité de la conversation : quelle est, selon chacune des élèves, l'explication à fournir ? Pour répondre à cette question, je vais examiner les usages multiples du prédicat $\pm$êt$re\ en\ fonction\ de$, qui passent relativement inaperçu sans une analyse approfondie, parce que la divergence entre les points de vue ne tient pas au sens que prend le prédicat en tant que tel, mais plutôt aux objets implicites sur lesquels il porte, c'est-à-dire à son usage. Nous avons vu que le prédicat, $\pm$êt$re\ en\ fonction\ de$, structure la conversation en tant que finalité : c'est l'explication à faire.

Selon l'hypothèse présentée ci-dessus, Aurélie comprend et utilise le prédicat de Sylvie ($\pm$êt$re\ en\ fonction\ du\ poids$), dont le sens affirmatif fait référence à une situation où l'objet n'est pas arrêté par un obstacle, que le poids de l'objet entraîne celui-ci sans retenue, et l'associe probablement au déterminé ($-$que le poids être exercé sur rien du tout) de l'explication de Barbara, n'ayant pas saisi le lien qui permet à Barbara de passer de ($-$ que le poids être exercé sur rien du tout) à ($-$ que ne pas tenir compte [du poids]). C'est ainsi qu'elle propose d'inverser la localisation de Barbara et Sylvie (I_{18} et I_{19}).

Barbara n'utilise pas $\pm$êt$re\ en\ fonction\ du\ poids$, mais elle semble comprendre l'expression comme menant à la conclusion qu'il faut ou ne faut pas "tenir compte du poids", puisque lorsque Sylvie fait la synthèse de leur premières explications (I_{14} et I_{15}) elle est d'accord que le déterminé ($-$que le poids être exercé sur rien du tout) est équivalent à $\pm$êt$re\ en\ fonction\ du\ poids$. Barbara comprend donc $\pm$êt$re\ en\ fonction\ du\ poids$ comme une information stratégique sur le fait qu'il faut, ou non, en tenir compte pour répondre à l'exercice, ce qui est cohérent avec son propre jugement (d_{11}), à savoir : ($-$ que ne pas tenir compte [du poids]). Dans la schématisation de Barbara le poids est important lorsqu'il s'exerce sur quelque chose, tandis que quand il *s'exerce sur rien du tout*, on peut l'ignorer. Dans la physique newtonienne, la force n'existe qu'au moment où il y a contact avec un autre corps, de telle sorte qu'une force *exercée sur rien du tout* constitue un abus de langage. Mais pour Barbara, qu'il n'y ait "aucune force" lorsqu'elle "s'exerce sur rien du tout" constitue la conclusion d'un raisonnement lui permettant de décider qu'il ne faut pas tenir compte du poids. Barbara a donc compris un aspect important de la physique newtonienne, qui a trait au concept de force, et qui n'est pas explicitement abordé dans l'extrait malgré son importance : elle fait plutôt référence à *la somme de forces* en réfléchissant au "poids", qu'à la *force*, singulière, exercée par la *gravitation* de la *masse* de la Terre. Plusieurs divergences sont à souligner avec la schématisation de Sylvie, quand bien même les deux élèves semblent d'accord : d'une part, Barbara fait un usage peu rigoureux des termes, au niveau conceptuel, ce qui contraste avec l'exigence - qui semble pourtant adressée à Aurélie - de distinguer rigoureusement {poids} et {masse} ; d'autre part, Barbara fait un usage particulier de {poids}, au sens où c'est plutôt *le poids d'un objet particulier*, c'est-à-dire la *force de gravitation universelle* avec les *deux* variables m et M spécifiées.

Sylvie modifie sa schématisation au cours de la conversation : elle s'accommode partiellement de l'usage indifférencié que font ses pairs de {masse, poids}. Elle fait ainsi visiblement l'effort de se rapprocher de ses camarades, en particulier lorsqu'elle fait une synthèse des explications pour Aurélie (I_{14} et I_{15}). Mais elle n'abandonne pas son objectif, et cherche à distinguer {poids} et {masse} pour reconstruire l'explication à partir de {masse}. Comme elle ne parvient pas à convaincre ses camarades de l'importance de cette différenciation en deux classes-objets, elle finit par utiliser {poids} dans sa synthèse en essayant d'y introduire un élément de sa différenciation, opérant ainsi :

$\gamma_{I.14}$: {poids} ⇒ {poids, poids de ce qui est attiré à la terre}.

La classe-objet {poids, poids de ce qui est attiré à la terre} est probablement une version raccourcie, adaptée aux usages de ses interlocutrices, et que je pourrais paraphraser comme un synonime de {masse}, quelque chose comme "la masse qui est attirée à la terre par une force que l'on appelle le poids". Cette formule qui tient du pléonasme, mais permet de faire émerger au niveau discursif la "masse" contenue dans la classe-objet indifférenciée {[masse], poids} dont seul le terme "poids" est explicite chez ses camarades. Cette stratégie logico-discusrive vise à faire comprendre que le "poids", de son point de vue, revêt un sens particulier ; c'est la force qui attire tous les objets à la terre, et à quoi elle ajoute la modulation μ "à la même vitesse".

C'est ainsi que lorsqu'elle reprend la localisation de Barbara (− que être en fonction du poids), il faut l'entendre comme "là où les objets lâchés tombent à la même vitesse", c'est-à-dire qu'elle fait référence à la situation-problème de l'item #1. Et c'est ce qui lui permet d'opérer la subtile équivalence, lorsqu'elle reprend Aurélie (I_{20}), entre (− que être en fonction du poids) et (− que ne pas être en fonction de la masse). En effet, du point de vue des connaissances de mécanique, lorsque c'est en fonction du "poids", selon l'expression de Sylvie à ce moment-là, les objets sont attirés vers la terre à la même vitesse, peu importe leur *masse* (le m est encore une variable dans cet usage de "poids"), alors que si la *vitesse* (ou l'instant d'arrivée) dépend de la *masse*, c'est du point de vue de Sylvie "en fonction de la masse" et non pas "en fonction du poids" (la variable m étant alors déterminée).

6.6.4.4 Énonciation des divergences selon les points de vue

La divergence se joue sur les objets auxquels s'applique le prédicat $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$, c'est-à-dire (•, {poids}) : pour Aurélie, c'est l'item #4 qui "est en fonction du poids", alors que pour Barbara c'est plutôt la somme des forces qui "est en fonction du poids", et dont elle tire une stratégie de résolution de problème pour l'item #4, à savoir que [dans cet exercice] "on tient compte du poids". Pour Sylvie, enfin, le prédicat $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ est utilisé de deux manières au fil de la conversation, car elle s'accommode des usages de ses camarades : c'est tout d'abord le poids qui "est en fonction de la masse", c'est-à-dire : $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ ({poids}, {masse}). Ensuite, c'est l'item #4 qui "est en fonction du poids", comme pour Barbara : $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ ({[l'item #4]}, {poids}).

Sylvie peine à construire sa schématisation, qui est plus complexe que celles de ses camarades, parce qu'elle aurait besoin d'un prédicat à trois places et hiérarchisé, à savoir quelque chose lui permettant de dire "{l'item #4} est en fonction du {poids} qui est en fonction de {la masse}", c'est-à-dire : $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ (•, Δ), où Δ comprend une détermination avec un second usage, subordonné, de $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ (•, •). Cela s'écrirait :

$$\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de\ (\{[\text{l'item } \#4]\},\ \Delta)$$
$$\text{où } \Delta \text{ comprend : } \quad \pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de\ (\{\text{poids}\},\ \{\text{la masse}\})$$

Cette analyse met en évidence la nuance du *sens* que prend $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ dans les opérations de Sylvie : le premier des usages exprimés ci-dessus à l'aide de la logique naturelle diffère du second... Ce déplacement de *sens* met en évidence l'accommodation de Sylvie à ses interlocutrices, car de son point de vue seule la seconde ligne schématise une relation au sein de la théorie newtonienne.

Barbara se contente d'affirmer que l'item #4 est "en fonction du poids", dont j'ai montré qu'il s'agit plus vraisemblablement d'un objet de discours unique pour *poids* et *masse*, et s'exprimerait donc ainsi : $\pm\hat{e}tre\ en\ fonction\ de$ ({[l'item #4]}, {poids, masse}).

À écouter les schématisation de ses deux camarades, Aurélie finirait par inverser les effets du *poids* dans les deux problèmes (items #1 et #4).

6.6.4.5 Corollaire aux précédentes hypothèses : deux manières divergentes de "faire de la physique"

Si l'on considère l'ensemble de cette enquête sur les divergences entre les points de vue de ces trois élèves, il apparaît désormais que Barbara et Sylvie en tout cas n'ont pas la même finalité dans la conversation. Barbara cherche le moyen de répondre à l'exercice, et pour cela elle utilise une stratégie qui repose sur des localisations (dans telle situation-problème, il faut tenir compte du poids, dans l'autre, il ne faut pas en tenir compte, opérations λ), et qui ne nécessite ni compréhension de la distinction entre *masse* et *poids* au niveau conceptuel, ni opérations mathématiques permettant de passer de la *masse* (propriété de l'objet), au *poids* (force exercée par la gravitation sur l'objet dans une direction et un sens précis), puis à l'*accélération* (la somme des forces exercées sur l'objet divisée par sa masse), et enfin à la *vitesse*. Barbara a donc la posture de l'élève qui *fait son métier* (Perrenoud, 1994/1995), qui interprète la situation dans laquelle elle se trouve comme *didactique* (Brousseau, 1998/2004) : elle cherche dans la situation-problème les indicateurs pertinents (ici, le fait que le poids est exercé sur rien du tout ou sur la table) permettant de savoir comment il faut procéder pour réussir. La stratégie de Barbara est efficace, mais elle ne peut être utilisée que pour des situations-problème connues, et est particulièrement adaptée dans notre cas parce que les élèves n'ont rencontrés que deux situations-problèmes, l'une où "le poids doit être pris en compte", et l'autre où "il ne doit pas être pris en compte". Cet indicateur fonctionne dès lors comme un organisateur de la pensée naturelle de Barbara.

Sylvie, de son côté, ne prend pas comme point de départ les situations-problème avec des opérations de localisation, mais la notion de (|POIDS|) avec des opérations d'ancrage basées sur ses connaissances conceptuelles, ce qu'indique les opérations d'ancrage (α et η) et les élaboration travaillant sur les faisceaux des objets (γ) à partir de sa représentation du concept de *poids*. Autrement dit, elle cherche une réponse à la demande d'explication d'Aurélie en travaillant sur les relations entre *masse*, *poids*, et *vitesse*, c'est-à-dire à partir de la théorie de Newton qui est censée leur permettre de répondre à l'exercice, selon le contrat didactique. Elle interprète la situation comme *adidactique*, ce qui est le but de l'enseignement selon la théorie de Brousseau (1998/2004).

L'opération $\mu_{I.4}$ ("en fait") de Sylvie est très intéressante pour illustrer son approche de la physique, en regard des résultats de l'analyse : elle cherche à comprendre ce qui se passe "en réalité" à l'aide du modèle enseigné de physique. Barbara est plutôt intéressée à ce qui permet de résoudre le problème "en classe". Le cadre de l'activité cognitive n'est pas le même. Peut-être en raison de cette meilleure maîtrise des ressources théoriques, Sylvie parvient à reprendre à sa charge les opérations de pensées cruciales amenées par Barbara, à savoir les localisations, et à les assimiler à sa schématisation tout en l'accommodant un peu pour rencontrer ses interlocutrices avec un langage intermédiaire. Cela lui permet de garder sa finalité - une explication conceptuelle - tout en reprenant la localisation effectuée par Barbara.

Barbara et Sylvie ont donc défini le problème différemment : Barbara effectue une analyse basée sur la situation-problème, mettant en œuvre une stratégie d'élève, alors que Sylvie effectue une analyse basée sur les concepts. Partagée entre ces finalités divergentes dans une situation de malentendu qui n'est pas identifiée comme telle, Aurélie peine évidemment à comprendre les explications, et mélange des éléments des deux discours dans sa tentative de formulation de réponse : elle reprend la localisation de Barbara, et la relation de Sylvie "être en fonction de", mais dans un sens inspiré par l'explication que Barbara construit autour du schème d'action du poids, "être exercé sur". Elle s'engage probablement aussi dans une situation de malentendu[536], en interprétant une partie de la schématisation de Barbara ("en fonction du poids") au niveau conceptuel, alors qu'elle a pour finalité la schématisation d'une procédure de résolution de problème ("en tenir compte"). Le sentiment de ne rien y comprendre avec lequel Aurélie termine l'extrait n'a finalement rien d'étonnant.

Le malentendu se termine par la passation de l'autorité à Sylvie, ce qui correspond à une résolution sociale du conflit, et non par la construction d'une compréhension commune, la résolution cognitive espérée par le dispositif didactique. Pourtant, on ne peut pas conclure qu'Aurélie, Barbara et Sylvie sont en désaccord concernant la réponse à l'exercice. Le malentendu est plus subtil : il porte sur le type d'explication qu'il faut donner, ou autrement dit sur ce qui fait une bonne explication, voire sur l'interprétation par les élèves du *milieu scolaire* (*didactique* versus *adidactique*). Pour Barbara, le savoir de physique consiste à appliquer la bonne procédure pour la situation-problème présentée, tandis que pour Sylvie le savoir consiste à utiliser des concepts de physiques (ici surtout le *poids*), ce qui nécessite notamment l'usage

536. Je n'ai pas pu soutenir cette hypothèse à l'aide des opérations logico-discursives, mais elle paraît vraisemblable au vu de l'ensemble de la situation d'interlocution.

du vocabulaire savant de manière appropriée. La stratégie de Barbara paraît plus abordable à Aurélie, qui parvient à y répondre alors qu'elle ne parvient pas à s'ancrer au discours de Sylvie.

Mais cette approche la conduit dans une impasse. En effet, la stratégie d'élève est peut-être suffisante pour résoudre les items #1 et #4 pour Barbara, en particulier après avoir glané au cours de l'activité Digalo des réponses justes, mais elle ne permet pas de faire face à une situation nouvelle en se reposant sur la généralité des concepts à partir desquels Sylvie schématise son explication. En ce sens, la finalité de Sylvie est plus ambitieuse, et constitue également une approche plus puissante sur le plan cognitif : elle lui permet de s'adapter à des situations variées, tant sur le plan de l'exercice de physique que dans son adaptation discursive à ses interlocutrices. Néanmoins, l'approche situationnelle de Barbara est une tentative de modélisation, quoique sans outillage (c'est justement ce qui n'est pas enseigné explicitement dans cette classe), qui consiste à travailler d'abord à la sélection des éléments pertinents en fonction de la question et de la situation-problème à résoudre avant de se lancer dans des opérations. Nous verrons d'ailleurs, à l'occasion de la prochaine situation de malentendu, que Barbara a bien compris cet enjeux de modélisation de la discipline.

Cette analyse a permis de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu, en mettant en évidence une divergence sur la manière dont se pose le problème pour Barbara et pour Sylvie. Il s'agit d'une situation de malentendu qui porte sur l'ensemble de leur schématisation, quand bien même il est possible d'identifier quelques opérations et éléments centraux à cette divergence. Ce sont les finalités des schématisations de Barbara et de Sylvie qui divergent : les deux finalités mises en évidence ici sont des classiques, connus des sciences de l'éducation au moins depuis les discussions de Brousseau (1998/2004) dans sa théorie des situations didactiques, et de Perrenoud (1994/1995) sur le métier de l'élève : Barbara interprète la situation-problème en tant que tâche scolaire, alors que Sylvie interprète la situation-problème en tant que tâche de physique. Autrement dit, nous avons pour la première *une situation didactique*, pour la seconde *une situation adidactique*.

6.6.5 Évolution de la situation de malentendu *deux manières divergentes de "faire de la physique"*

Suite à cette situation de malentendu, où la finalité ambitieuse de la schématisation de Sylvie est mise en échec, nous pourrions nous demander si cette élève ne se décourage pas par la suite, pour se contenter de faire ce qu'on lui demande, sans chercher à comprendre. À la fin de la séquence, lors de la correction orale par l'enseignant, Sylvie pose une question qui nous fournit un indice qu'elle est loin de s'être découragée.

Enregistrement à la fin de l'activité Marbles Move - demi-classe A

```
1  E:        d'autres remarques? (..)
2  Sylvie:   hum (.)
3  E:        oui?
4  Sylvie:   j'aurais voulu peut-être-
5  E:        s'il-vous-plaît (c) chut
6  Sylvie:   plus hum (.) comprendre le fait hum (.) pourquoi la (.) la bille 1 elle donne
7            (.) sa vitesse et sa masse à la bille deux (.) comprendre pourquoi (.) parce
```

8 qu'on a fait que deux- enfin sa vitesse (.) parce que pour l'instant on a fait
9 que de l'expérience quoi on a seulement décrit: et puis
10 E: [oui
11 Sylvie: tout] ça
12 E: très bonne remarque

05.12.2006 34'34" à 34'59"

Dans cet extrait, Sylvie continue de percevoir le milieu comme adidactique : elle demande plus d'explications relatives aux concepts sur une partie des activités (celles avec le logiciel Marbles Move), malgré la réussite de ces activités sans erreurs : elle est restée sur sa faim...

6.7 Situation #6 : *une parodie pour revanche*

6.7.1 Résumé

Au cours de séances de travaux pratiques centrées sur l'usage du microworld MarblesMove (phase 2 de la séquence), trois élèves (Aurélie, Barbara et Sylvie) s'engagent dans une conversation parodique au sujet de la physique pendant plusieurs minutes[537]. Les élèves, pourtant habituellement studieuses et sérieuses, font semblant de *faire de la physique* dans une conversation où elles enchaînent les chiffres et les expressions mathématiques compliquées, et poussent le sarcasme jusqu'à prétendre "jouir" de leur présente activité intellectuelle. Cette conversation est intéressante au niveau du contenu, puisque l'ironie et le dérisoire avec lesquels ces élèves mettent en scène la discipline scolaire fournit au chercheur des indices quant aux représentations qu'elles se font de la physique. L'émergence de cette parodie à un moment précis des activités des élèves renseigne également sur le sens que prend cet événement dans le contexte des activités de classe. En effet, le moment où cette parodie a lieu me permet d'identifier un incident critique, en lien avec l'intervention de l'enseignant dans le travail de groupe de ces élèves juste *avant* la conversation parodique, alors que dans toutes les autres leçons enregistrées au cours de la recherche, ces élèves sont concentrées sur leurs tâches scolaires. C'est la question à laquelle l'analyse de la situation devra répondre : qu'est-ce qui a conduit ces élèves à soudainement s'engager dans une conversation parodique ?

L'analyse permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu en amont de l'émergence de la conversation parodique, qui peut rendre compte de son apparition à travers le découragement des élèves, voire la perte de confiance en leur compétence à effectuer leur travail d'élève en physique. En effet, juste avant l'incident critique, les élèves s'engagent dans une résolution complexe de l'exercice 5D, en travaillant dans une co-construction serrée et efficace. Peu sûres de la pertinence de leur travail, les élèves appellent l'enseignant pour vérifier leur solution, avant d'arriver au bout de l'exercice. S'ensuit un échange où les élèves et l'enseignant négocient brièvement sur la manière de procéder pour répondre à l'exercice 5D. Or, l'enseignant et les élèves concluent de cet échange que la schématisation précédemment co-construite par les élèves est erronée. Les élèves recommencent l'exercice depuis le début, en suivant la procédure indiquée par l'enseignant. Pourtant, leur précédente solution n'était pas erronée...

La situation de malentendu mise en évidence porte plus particulièrement sur cet échange entre l'enseignant et les élèves, dont la finalité consiste à vérifier la pertinence du travail des élèves. Or, l'analyse met en évidence une schématisation par les élèves de leur solution est trop succincte pour que l'enseignant puisse adopter leur point de vue, et l'absence de questionnement de sa part spécifiquement orienté vers l'explicitation de leur point de vue ne lui permet pas de comprendre ce qu'elles ont fait. En conséquence, l'enseignant n'accommode pas son discours à la requête des élèves, et finit par indiquer la formule arithmétique à utiliser pour résoudre l'exercice autrement, formule écrite sur une feuille *ad hoc* que les élèves ont oublié de prendre en classe. Convaincues de leur tort sur la base de cet "oubli", les élèves acceptent la procédure de l'enseignant et abandonnent le travail qu'elles ont menées de manière coopérative jusque là.

537. La transcription de l'échange entre les élèves est disponible en annexe (section C.6, p. 916).

L'échange a pour effet d'interrompre la conversation de ces élèves sur la physique, pourtant vive et pertinente auparavant. Dans la procédure indiquée par l'enseignant, qu'elles suivent désormais, elles n'ont plus de tâche de résolution de problème, ni de réflexion à faire, leur travail se bornant désormais à effectuer les opérations mathématiques exigées par la procédure indiquée, ce qu'elles font à l'aide de leur calculatrice.

Cette situation de malentendu est particulière à plus d'un titre. Premièrement, ce n'est pas tant dans la divergence des schématisations qu'elle s'observe, mais plutôt dans le contraste entre le résultat de la négociation entre l'enseignant et les élèves, d'une part, et le travail effectivement réalisé par les élèves, d'autre part. Il s'agit plutôt de points de vue qui ne se rencontrent pas, que de points de vue qui divergent quant à des éléments de savoir mis en discours. Deuxièmement, les élèves, par l'effet coercitif de la négociation, abandonnent leur propre réflexion et adoptent une posture d'obéissance dont les effets sur l'apprentissage ne sont pas négligeables. En commentaire, j'aborde justement brièvement le lien qu'entretient cette situation de malentendu avec la précédente, qui constitue la suite des réflexions de ces trois élèves sur le mouvement horizontal uniformément accéléré.

Finalement, la discussion permet également de revenir sur l'origine de la situation de malentendu : le fait que l'exercice 5D ait été conçu par le chercheur permet-il d'expliquer la situation de malentendu ? En effet, la première schématisation des élèves pour répondre à l'exercice 5D correspond à la réponse escomptée par le chercheur, mais l'enseignant les oriente sur une autre manière de procéder. Le fait que l'enseignant n'est pas le concepteur de l'exercice a peut-être amené une interférence dans la communication en classe. Dans les pratiques d'enseignement, il s'agit néanmoins d'une situation assez banale : les enseignants ne sont que rarement concepteurs de tous les exercices utilisés.

6.7.2 Présentation de l'incident critique

6.7.2.1 Présentation de la tâche

Un incident critique apparaît au cours des échanges du groupe composé d'Aurélie, Barbara et Sylvie, à la phase 2 de la séquence, c'est-à-dire au moment où les élèves travaillent en groupe avec le logiciel Marbles Move. Les élèves ont terminé les exercices 1 à 4 (voir figures B.10, B.11, B.12 et B.13, pp. 812 à 815), exigeant l'utilisation de l'ordinateur pour effectuer diverses "mesures", ou plus précisément des relevés des chiffres présentés par le logiciel à des moments précis de la simulation. Elles ont commencé les "exercices d'application", les exercices de la série 5 (voir figure B.14, p. 816). Ces exercices ne nécessitent pas directement l'utilisation du logiciel, mais ont été conçus par le chercheur [538] dans la continuité des activités précédentes dans le but de proposer aux élèves des questions pour lesquelles les activités précédentes fonctionnent comme ressources. Les élèves travaillent en groupe et préparent une réponse commune aux questions des exercices.

538. Comme expliqué au chapitre 4 (voir notamment la section 4.3.2.4, p. 265 et suivantes), c'est le chercheur qui est le concepteur de cette série d'exercices, que l'enseignant a repris telle quelle pour son cours.

Dans la situation discutée ici, Aurélie, Barbara et Sylvie travaillent à l'exercice 5D de cette série 5, dont la consigne est reproduite dans la figure 6.32 (voir ci-dessous).

D) Calculer la force de frottement (en Newton) exercée sur la bille n°1 lors de son parcours horizontal, en sachant que la bille a une vitesse instantanée de 36 m/s au début du plan horizontal, et de 30 m/s après un parcours de 100 mètres.

... lorsque la bille n°1 a une masse de 2 kg : _____

... lorsque la bille n°1 a une masse de 50 kg : _____

FIGURE 6.32 – Consigne de l'exercice 5D.

Je présente ci-dessous le cheminement escompté pour répondre à l'exercice 5D, tel que je l'ai pensé avant la mise en œuvre de la séquence.

6.7.2.2 Présentation des réponses escomptées

Du point de vue du concepteur de l'exercice, l'exercice 5D exige des élèves le calcul de l'intensité d'une force de frottement (en $Newton$) exercée sur une bille en mouvement horizontal, à partir des valeurs de vitesse de la bille fournies dans la consigne, pour le début et à la fin du parcours, et à partir des valeurs des masse des billes, selon deux variantes spécifiées dans la consigne.

En outre, les élèves peuvent s'aider du simulateur Marbles Move ou esquisser un schéma pour représenter la situation. La figure 6.33 ci-dessous présente un exemple d'un tel schéma, du point de vue du concepteur de la tâche :

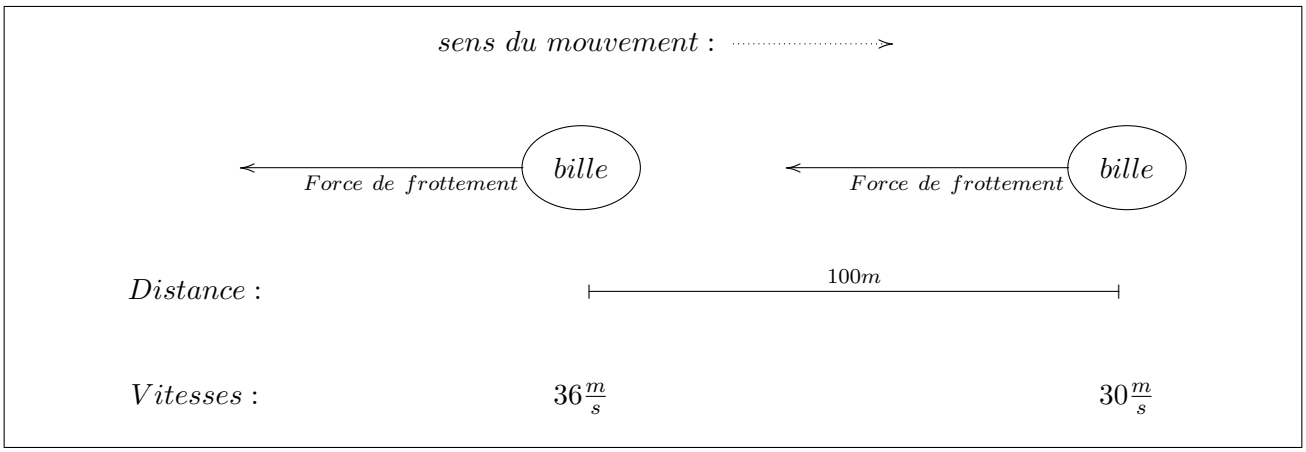
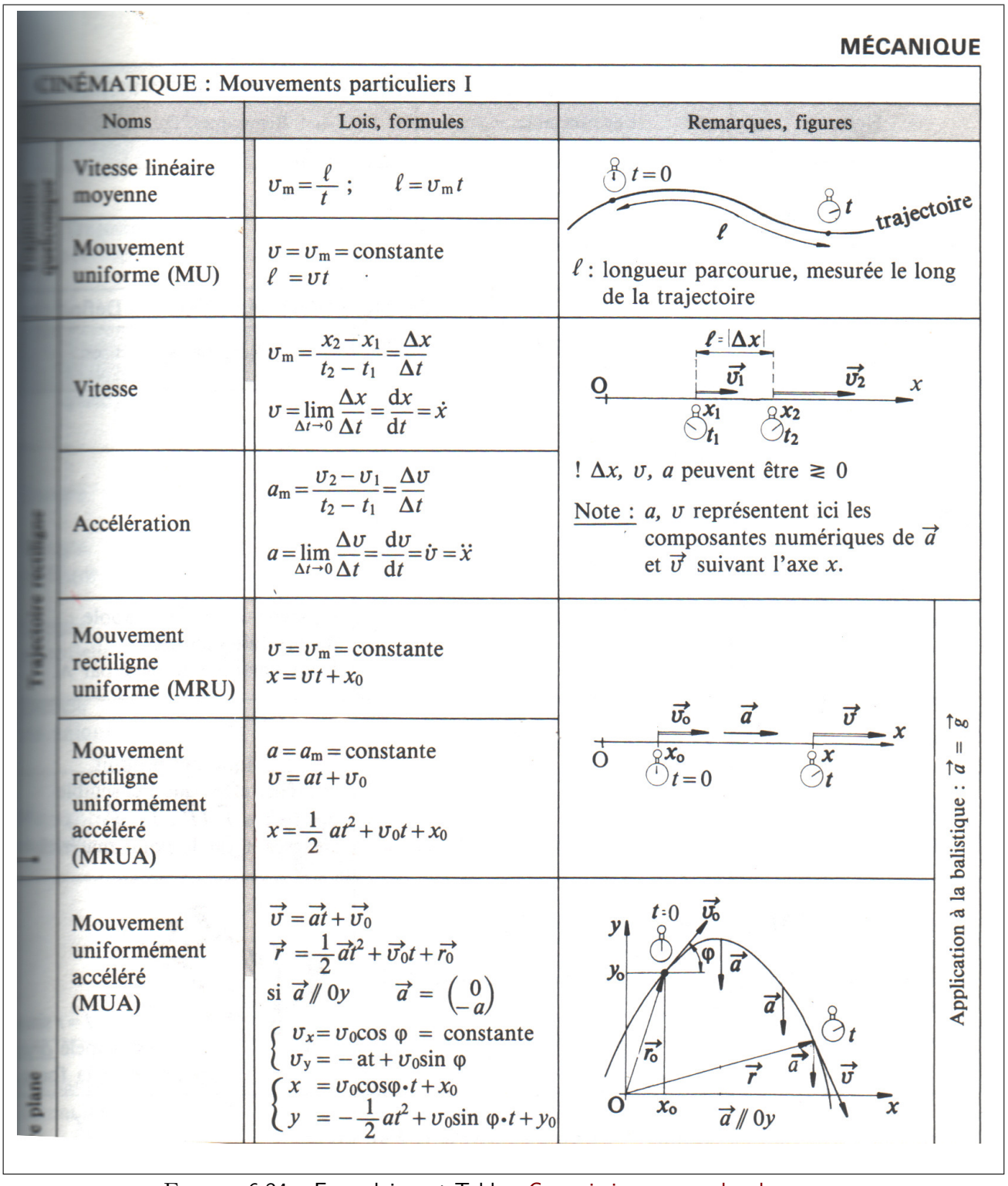


FIGURE 6.33 – Schéma pour la résolution de l'exercice 5D, du point de vue du concepteur.

Les élèves disposent d'un ouvrage établi par l'association des enseignants de mathématique, physique et chimie de Suisse Romande, dénommé Formulaires et Tables (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985). La figure 6.34 représente un extrait de la page de référence du *Formulaires et Tables* à laquelle les élèves peuvent recourir pour les formules du domaine de la Mécanique permettant

de traiter les *mouvements particuliers* de cinématique comme celui auquel se réfère la question 5D. Le concepteur de la tâche a pris en considération cette référence lors de la rédaction de la consigne.



MÉCANIQUE

CINÉMATIQUE : Mouvements particuliers I

Noms	Lois, formules	Remarques, figures
Vitesse linéaire moyenne	$v_m = \frac{\ell}{t}$; $\ell = v_m t$	ℓ : longueur parcourue, mesurée le long de la trajectoire
Mouvement uniforme (MU)	$v = v_m =$ constante $\ell = vt$	
Vitesse	$v_m = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ $v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$	! Δx, v, a peuvent être $\gtrless 0$
Accélération	$a_m = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ $a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \dot{v} = \ddot{x}$	Note : a, v représentent ici les composantes numériques de $\vec{a}$ et $\vec{v}$ suivant l'axe x.
Mouvement rectiligne uniforme (MRU)	$v = v_m =$ constante $x = vt + x_0$	
Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)	$a = a_m =$ constante $v = at + v_0$ $x = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t + x_0$	
Mouvement uniformément accéléré (MUA)	$\vec{v} = \vec{a}t + \vec{v}_0$ $\vec{r} = \frac{1}{2}\vec{a}t^2 + \vec{v}_0 t + \vec{r}_0$ si $\vec{a} \parallel 0y$ $\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ -a \end{pmatrix}$ $\begin{cases} v_x = v_0 \cos\varphi = \text{constante} \\ v_y = -at + v_0 \sin\varphi \end{cases}$ $\begin{cases} x = v_0 \cos\varphi \cdot t + x_0 \\ y = -\frac{1}{2} at^2 + v_0 \sin\varphi \cdot t + y_0 \end{cases}$	

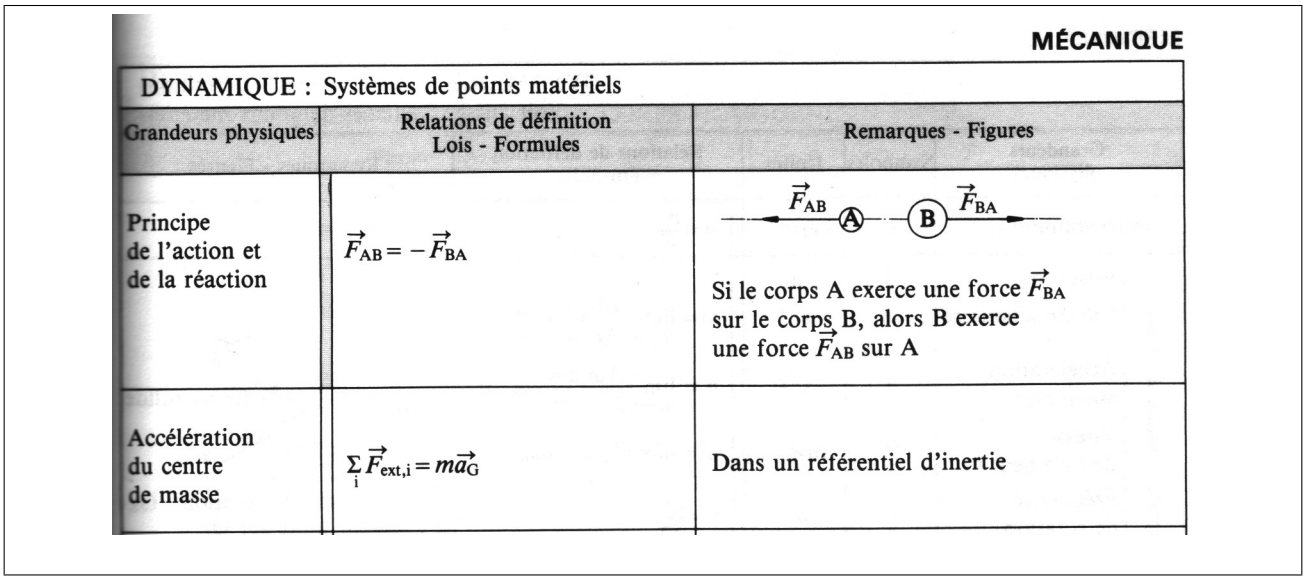
Application à la balistique : $\vec{a} = \vec{g}$

FIGURE 6.34 – Formulaires et Tables, Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985, p. 159.

Les formules présentées sur cette page permettent une analyse du mouvement à l'aide des mesures de *temps*, *vitesse* et *accélération*. La réponse escomptée à la question 5D s'exprime sous la forme de l'intensité d'une *force*. Les élèves peuvent recourir à l'expression algébrique de la loi de la somme des forces pour

passer de la valeur d'accélération de la bille, à des valeurs pour la somme des forces exercées sur la bille pendant son trajet. Ils peuvent calculer l'intensité de la somme des forces exercées sur la bille à partir de son accélération et de sa masse, à l'aide de l'expression mathématique de la loi de la somme des forces (voir section 6.1.2, p. 381) : $\overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$.

Cette formule est encore rappelée à l'exercice précédent, l'exercice 5C (voir figure B.9, p. 799). Elle se trouve aussi dans le *Formulaires et Tables* à la section *Dynamique : systèmes des points matériels*, quoique sous une forme plus précise, reproduite par la figure 6.35 ci-dessous (p. 601).



MÉCANIQUE

DYNAMIQUE : Systèmes de points matériels

Grandeurs physiques	Relations de définition Lois - Formules	Remarques - Figures
Principe de l'action et de la réaction	$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$	$\vec{F}_{AB}$ A B $\vec{F}_{BA}$ Si le corps A exerce une force $\vec{F}_{BA}$ sur le corps B, alors B exerce une force $\vec{F}_{AB}$ sur A
Accélération du centre de masse	$\sum_i \vec{F}_{ext,i} = m\vec{a}_G$	Dans un référentiel d'inertie

FIGURE 6.35 – Formulaires et Tables, Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985, p. 165.

Cette forme plus précise fait référence à la *somme des forces extérieures*[539], à l'*accélération du centre de masse*[540] dans un *référentiel d'inertie*[541].

La version simplifiée de l'expression mathématique, à savoir $\overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$, n'exige pas des élèves de comprendre tous ces concepts. Néanmoins, il est attendu des élèves qu'ils sachent l'utiliser avec les deux précautions suivantes : "$\overrightarrow{F}$" dans cette formule représente la somme des forces (et devrait donc s'écrire $\sum \overrightarrow{F}$ en toute rigueur), et le symbole $\rightarrow$ signifie qu'il s'agit d'un vecteur, c'est-à-dire que les élèves doivent prendre en compte les directions et le sens de ces vecteurs pour en calculer l'intensité. Ces deux précautions exigent un minimum de modélisation de la part des élèves : avant de pouvoir utiliser $\overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a}$ pour transformer l'intensité du vecteur *accélération* de la bille en intensité du vecteur *force de frottement*, il faut (1) analyser la situation afin d'inclure d'éventuelles autres forces dans le calcul et (2) examiner le sens et les directions des vecteurs, par exemple en dessinant un schéma, ou "dessin des forces" (voir l'analyse de cette pratique effectuée à l'occasion de la situation de malentendu #7, section 6.8, p. 631).

539. En effet, on ignore ici les forces internes à la bille telles que la compression ou dilatation.
540. En effet, on traite la bille comme un point matériel dans la résolution de cet exercice et non comme un objet disposant d'une inertie rotationnelle, par exemple.
541. En effet, les effets de la rotation de la Terre sur le mouvement de la bille, pour ne donner que cet exemple, sont également ignorés dans cet exercice.

Voici en bref les deux étapes du raisonnement exigé par la tâche en vue d'une utilisation pertinente de la loi de la somme des forces à l'exercice 5D :

1. Dans un premier temps, il s'agit d'examiner si d'autres forces que la force de frottement, dont la consigne exige de fournir l'intensité, sont exercées sur la bille et de réfléchir à leur sens et à leur direction de manière à pouvoir calculer la somme des forces. Les autres forces s'exerçant sur la bille de l'exercice 5D sont (i) la force de gravité (ii) et la force de soutien de la surface horizontale. Ces deux forces sont perpendiculaires à la force de frottement, qui va dans la direction du mouvement mais en sens opposé, et s'annulent, car elles ont une intensité identique (selon le principe énoncé par la loi de la force opposée (voir section 6.1.2, p. 381). En conséquence, les forces de gravité et de soutien n'ont aucun effet sur l'intensité de la somme des forces, qui peut être déterminée uniquement à partir de la force de frottement.

2. Dans un deuxième temps, il s'agit d'examiner le sens et la direction du vecteur de force de frottement par rapport au sens et à la direction de l'accélération, vitesse et mouvement de la bille. Le vecteur de la force de frottement est de même direction et de sens opposé au mouvement : l'intensité de la force de frottement sera donc de signe inverse à la vitesse et à l'accélération.

3. Des deux étapes ci-dessus, la loi de la somme des forces peut être précisée pour le cas de l'exercice 5D de la manière suivante : $F_{frottement} = -m \cdot a$. Cette expression mathématique permet de répondre à la question 5D, car elle permet de déterminer l'intensité de la force de frottement.

En plus de cet usage de la loi de la somme des forces, les élèves doivent encore déterminer l'intensité de l'accélération de la bille - ou de la décélération de la bille puisqu'il s'agit d'une accélération négative - car la consigne ne fournit que deux valeurs pour la vitesse.

Les formules de la page 159 du *Formulaires et Tables* (voir figure 6.34, p. 600), en particulier : $v = at + v_0$. Cette formule est valable lorsque le mouvement est uniformément accéléré. Ce n'est pas forcément le cas ici, si l'on considère la force de frottement fonction de la vitesse de la bille (p.ex. dans une étude d'aérodynamisme). Néanmoins, vu qu'il suffit, pour répondre à la question posée, de s'intéresser à la décélération moyenne sur l'ensemble du parcours de la bille, le modèle peut être simplifié en traitant le mouvement comme uniformément accéléré, à condition que cette accélération soit la décélération moyenne de la bille de $36\frac{m}{s}$ à 30 $\frac{m}{s}$. Il aurait alors peut-être fallu préciser, dans la consigne, que l'on s'intéresse à la force de frottement "moyenne" exercée sur la bille au cours de son trajet de $100 mètres$. Quoiqu'il en soit, l'objectif de cet exercice consistait justement à voir si les élèves parviennent à façonner leur propre modèle d'un cas de figure qui est un peu différent de ceux habituellement présentés, puisque la consigne ne fournit pas l'accélération qui permettrait aux élèves de l'injecter dans l'expression mathématique sans s'engager dans un processus de modélisation du mouvement de la bille.

La formule $v = at + v_0$ permet de calculer l'accélération à partir de la vitesse, mais exige de connaître le temps d'un déplacement d'une position x_0 à x, ce que l'exercice 5D ne communique pas. Le temps du déplacement de la bille sur les 100 $mètres$ peut néanmoins être calculé en considérant que la vitesse

moyenne de la bille est la moyenne des vitesses au début ($36m/s^2$) et à la fin du déplacement ($30m/s^2$), à savoir $33m/s^2$. La formule $x = vt+x_0$, où x est la distance en $mètres$, v la vitesse en $mètres\ par\ seconde$, et t le temps en $secondes$, permet de poser l'équation $100m = 33\frac{m}{s}t + 0m$, où le temps vaut $t = \frac{100m}{33\frac{m}{s}}$, à savoir environ 3 $secondes$.

Une fois le temps du déplacement de la bille sur 100 $mètres$ déterminé, nous pouvons maintenant utiliser la formule $v = at + v_0$ pour trouver l'accélération de la bille à partir des vitesses au début ($V_0 = 36\frac{m}{s}$) et à la fin ($V = 30\frac{m}{s}$) du déplacement de x_0 à x. Ceci nous permet de poser l'équation $30\frac{m}{s} = a\ \cdot 3s + 36\frac{m}{s}$, où l'accélération vaut $a = \frac{30\frac{m}{s} - 36\frac{m}{s}}{3s}$, à savoir $-2\frac{m}{s^2}$. Le résultat étant une valeur négative, il s'agit bien d'une décélération.

Il ne nous reste plus qu'à multiplier la décélération de la bille par la masse de la bille pour les deux cas proposés, respectivement une masse de 2 kg et une masse de 50 kg, pour trouver l'intensité des forces de frottement dans les deux cas de figure, en prenant soin de changer le signe en raison de la direction opposée des vecteurs accélération et force. Voici les solutions numériques pour les deux cas de la question 5D :

1. Avec une bille de masse de 2kg, la force de frottement exercée sur la bille vaut $2x2 = 4N$.
2. Avec une bille de masse de 50kg, la force de frottement exercée sur la bille vaut $2x50 = 100N$.

Cette manière de construire une réponse à la question de l'exercice 5D n'est pas la seule possible, comme nous le verrons, mais c'est celle qu'a envisagé le concepteur de l'exercice en prenant soin de choisir des chiffres qui ne nécessitent même pas l'usage d'une calculatrice, dans l'intention de centrer l'effort des élèves sur la modélisation, l'analyse du mouvement et les choix de ressources pertinentes parmi celles à disposition (en particulier les formules vectorielles et algébriques).

6.7.2.3 Présentation des traces

L'incident critique qui a permis le repérage de cette situation de malentendu est l'apparition, dans un groupe d'élèves, d'une conversation d'un autre genre : une parodie. Un passage de plus de deux minutes de la conversation du groupe comprenant Aurélie, Barbara et Sylvie est consacré à une parodie de la physique, qui a d'autant plus surpris le chercheur que les élèves de ce groupe entretiennent par ailleurs des conversations soutenues et focalisées sur leurs tâches de physique tout au long de la séquence. Le passage parodique est reproduit ci-dessous dans son intégralité :

Transcription 5. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 60' à 63'

Enregistrement audio

1		((chuchotements))
2	Aurélie:	vas-y commence
3	Barbara:	c'est tellement bien la physique et puis franchement quoi (.) j'atteins
4		un orgasme à chaque fois
5		((rires étouffés))

Barbara: non mais (.) franchement (.) bon ben arrêter moi j'aimerais bien faire le suivant (.) alors (.) comment ça se passe? ((rires))
Sylvie: ta gueule
Barbara: le suivant il faut faire l'accélération avec les Newton (.) non?
Aurélie: ouais mais divisé par le (.) le cosinus de (.) alpha-
Barbara: et puis par la tangente de (.) de:-
Aurélie: de deux-cent quatre-vingt [là-
Barbara: deux] cents [cinquante-neuf
Aurélie: parce que deux cents] [quatre-vingt c'est-
Barbara: non de deux cents cinquante-neuf] virgule quatre-vingt six
Aurélie: voilà parce que deux cents quatre-vingt c'est le log de cinq cents virgule quarante trois moins
Barbara: et puis ça veut dire que (.) en fait le cosinus qui est par là le sinus
Aurélie: ((rire))
Barbara: va avec la tangente parce que chaque angle de deux cents nonante neuf virgule cinquante-huit virgule cinq- ((rire))
Aurélie: voilà (.)
Barbara: ça part en fait en [décilitre
Aurélie: oui mais comme] c'est des pommes de terre tu peux pas dire que- ((rire)) (..) non mais il y a l'accélération du soleil (.) il y a le système (..) de l'espace qui donne de
Barbara: ouais mais en fait l'accélération g (.) non enfin (.) g (..) neuf virgule quatre-vingt un (.) ça (.) en fait ça (.) ça diminue tout sur (.) sur en fait l'accélération heu (.) solaire (.) [du système solaire
Aurélie: mais si vous avez des salades? ((rires))
Barbara: oui mais c'est pas la raison pour que (.) pour que l'hypoténuse elle soit heu (.) partante avec la tangente
Aurélie: ben si parce que si tu prends l'hypoténuse avec la tangente ça joue pas
Barbara: ben non-
Aurélie: ce sera pas vert
Barbara: et pis l'influence de l'air ? ((rire)) avec tous les molécules et [puis les photons
Aurélie: mais non mais tu] là on est dans l'espace on est pas dans l'air hein
Barbara: oui mais bon
Aurélie: [regarde?
Barbara: autant] les électrons qui tournent autour du noyau on les néglige?
Aurélie: ((rire aux éclats))
Barbara: voyons on les néglige? (.) vu que la masse du noyau elle est (.) en fait la masse (.) du (.) du noyau est égale au noyau
Aurélie: [ouais
Barbara: non] de l'atome est égale à la masse du noyau [en-
Aurélie: non] [la masse de l'atome
Barbara: parce qu'on] néglige les électrons (..) et puis [ce qui fait qu'on-
Aurélie: non mais je] ne comprends pas (.) pourquoi on négligerait les électrons ? les électrons c'est quand même [un élément
Barbara: mais les électrons] c'est parce que ça tourne autour du noyau madame
Aurélie: ben oui [il y a un mouvement
Barbara: et puis après] [il n'y a plus d'électrons solaires sur la moléculaire

```
55 Aurélie:  mais le soleil il pourrait plus marcher s'il n'y avait plus d'électrons
56           (.) on peut pas les négliger ces électrons
57 Barbara:  oui mais ça dépend (.) de temps en temps on les néglige de temps en
58           temps pas (.) ça dépend [en fait ce que tu veux chercher
59 Aurélie:  (X) (X) (X) (X)]
60 Barbara:  si tu veux chercher la masse du noyau ben (.) genre par exemple avec
61           une fleur (.) ben là ben (.) ben il faut qu'on en tienne compte quoi (..)
62 Aurélie:  bon (.) alors (.) on va reprendre cette-
```

Malgré le style parodique de cet échange, dont la finalité consiste à se faire rire plutôt qu'à faire de la physique, plusieurs éléments méritent d'être signalés concernant le rapport que ces deux élèves entretiennent à la discipline scolaire :

— Sylvie ne participe pratiquement pas à la parodie et, au risque d'anticiper sur la suite, je signale déjà ici mon hypothèse pour en rendre compte : elle a moins le sentiment de "ne rien y comprendre" que ses camarades, et nous verrons qu'elle défend la solution du groupe auprès de l'enseignant, et qu'elle n'adhère pas forcément à l'avis de l'enseignant ;

— l'échange commence par se focaliser sur la trigonométrie [542] et les calculs compliqués, donnant une large part de l'échange à des expressions chiffrées ;

— l'échange souligne le sentiment d'absurdité qu'ont peut-être vécu ces élèves au moment de la modélisation des situations, en mélangeant dans leur discours "pommes de terre", "accélération du soleil" et le fait d'être "dans l'espace", et parmi ces éléments le fait de "négliger" ou non prend un place importante [543] ;

— Barbara exprime vers la fin de l'échange l'un des fondements épistémologiques de la modélisation lorsqu'elle énonce "ça dépend en fait ce que tu veux chercher" (ligne 58).

Si cet échange permet de relever ces quelques caractéristiques de la perception de la discipline scolaire par les élèves, qui ne sont pas dénuées de compréhension, ce qui nous intéresse plus particulièrement dans la recherche de situation de malentendu, c'est la raison pour laquelle les élèves initient cet échange parodique. Pour répondre à cette question, je me suis intéressé dans un premier temps à l'enchaînement conversationnel qui conduit les échanges des élèves à ce passage. Il s'agit de situer l'apparition de cet échange dans les activités de physique de ces élèves. Un synopsis (voir la figure 6.36, p. 606) présente le déroulement des échanges verbaux des deux leçons de physique de ce jour-là, jusqu'au moment parodique.

La première colonne (à gauche de la flèche du temps) donne les indications minutées, alors que la deuxième colonne (à droite de la flèche du temps) présente dans un encadré le type d'interlocution en cours et les locuteurs actifs, pour le groupe étudié. Je me suis basé sur les travaux de pragmatique situationnelle de

542. La trigonométrie est utilisée pour déterminer la valeur de la somme des forces en fonction de l'angle entre les vecteurs qui représentent les forces exercées sur l'objet, et est souvent perçue comme difficile par les élèves.
543. On reconnaîtra bien sûr ici la décision arbitraire qui consiste à négliger ou non les forces de frottement, sur laquelle repose plusieurs des difficultés rencontrées par les élèves.

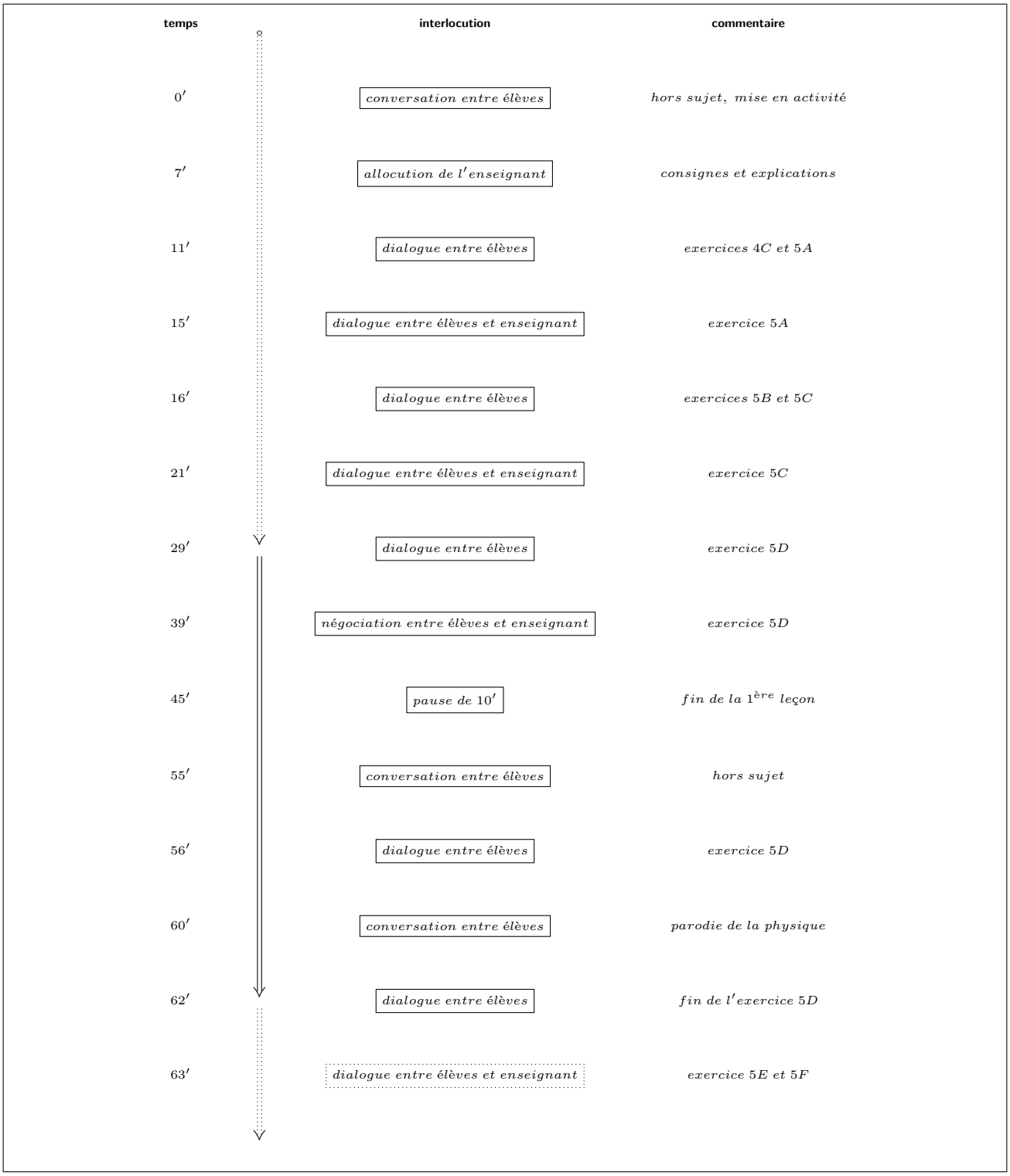


FIGURE 6.36 – Synopsis des interlocutions du groupe d'Aurélie, Barbara et Sylvie au cours des deux leçons.

Jacques (1988) pour distinguer divers types d'interlocution. Les moments ont été définis chaque fois qu'un changement important se produit au niveau des interlocuteurs actifs ou de l'interlocution, par exemple le passage d'un dialogue orienté sur la tâche à une conversation sur la vie des élèves. Cependant, comme le but est ici de présenter de manière synoptique le déroulement de l'ensemble des leçons, j'ai parfois

ignoré une ou quelques interventions n'ayant pas d'effet durable sur le cours des interactions du groupe. La troisième colonne (tout à droite) est réservée à des commentaires.

Pour proposer une explication à la conversation parodique, je suis remonté à partir du début de cette conversation pour examiner ce qui se passe *avant* dans le déroulement séquentiel de l'interlocution, avec pour objectif de trouver des indices permettant de reconstruire le sens que donnent les élèves à leur activité, de manière à ce que l'incident critique apparaisse comme un événement cohérent dans le déroulement de l'interlocution, du point de vue des élèves et dans la singularité de leur situation. En regardant chaque moment qui précède la conversation parodique séparément, je n'ai trouvé aucun indice permettant d'anticiper l'émergence d'une conversation parodique : il n'y a pas d'autres moments inhabituels qui pourraient amener les élèves à cette conversation parodique, ni de tentative d'amorcer une telle conversation. Hormis quelques conversations hors sujet, l'activité interlocutoire des élèves paraît non seulement tout à fait habituelle pour le cadre, mais aussi rigoureusement focalisée sur les tâches qui sont les leurs. Il nous faut donc examiner plus en détail la situation interlocutoire dans laquelle émerge la conversation parodique.

Le synopsis permet de situer l'émergence de la conversation parodique dans une phase de plus de vingt minutes pendant laquelle les élèves travaillent à l'exercice 5D, que j'ai mise en évidence dans la figure 6.36 (p. 606) par une flèche plus marquée. Ce travail à l'exercice 5D se déroule en trois moments distincts, que je résume ci-dessous :

1. Le premier moment (minutes 29 à 39) constitue un dialogue entre les trois élèves portant essentiellement sur la procédure à adopter pour résoudre l'exercice 5D. Les élèves raisonnent collectivement : elles "tâtonnent" comme le décrivent parfois les enseignants de Suisse romande, et construisent une stratégie de résolution qu'elles n'appliquent cependant pas tout de suite, préférant appeler l'enseignant pour vérifier si elle est correcte.

2. Le second moment (minutes 39 à 45) est une discussion du groupe avec l'enseignant, à l'initiative des élèves. L'enseignant ne valide pas la stratégie de résolution du groupe, et en propose une autre, reposant sur l'usage d'un formulaire *ad hoc* - une feuille imprimée où se trouvent des formules utiles pour le chapitre travaillé - que les élèves n'avaient pas sous la main (pour l'avoir laissé dans leurs sacs ou ailleurs). Ce passage est plutôt du type *négociation* (Jacques, 1988) que du type *dialogue*, au sens où la finalité de l'interlocution n'est pas forcément la même pour les élèves et pour l'enseignant. Nous y reviendrons. Ce moment se termine avec la fin de la première leçon de 45 minutes, et l'enseignant envoie ses élèves en pause.

3. Le troisième moment (minutes 56 à 60) est le dialogue entre élèves quand elles reprennent le travail après la pause avec la stratégie de résolution donnée par l'enseignant. Le dialogue n'est plus orienté vers la recherche d'une solution ou d'une stratégie de résolution, mais vers l'effectuation de procédures mathématiques permettant de produire une réponse chiffrée à la question 5D. Ce troisième moment est interrompu par la conversation parodique : après la parodie, les élèves reprennent et terminent l'exercice 5D en y consacrant encore une minute toutes les trois.

En examinant l'enchaînement conversationnel de ces trois moments - les rapports qu'ils entretiennent entre eux - je peux faire une hypothèse sur ce qui a éventuellement déclenché l'incident critique : il y a une *rupture*[544] entre le premier moment où les élèves construisent leur propre stratégie de résolution, et le troisième moment où elles appliquent la procédure fournie par l'enseignant. Je fais l'hypothèse que cette rupture a conduit les élèves à s'engager dans une conversation parodique. Pour évaluer cette hypothèse, il est nécessaire d'entrer dans le détail de la construction de la schématisation des élèves et de l'enseignant, au moment de leur *négociation*, de la $39^{ème}$ à la $45^{ème}$ minutes de la première leçon.

Cette interaction porte sur l'exercice 5D dont la réponse escomptée a été présentée ci-dessus du point de vue de son concepteur (voir section 6.7.2.2, p. 599 et suivantes). Il s'agit à présent de reconstruire les points de vue des élèves et celui de l'enseignant - en situation - pour pouvoir éventuellement mettre en évidence des divergences entre ces schématisations.

6.7.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue

Dans cette reconstruction, je présente exceptionnellement les attentes de l'enseignant *après* le cheminement des élèves, car contrairement aux situations précédentes, l'échange[545] est à l'initiative des élèves et non de l'enseignant.

6.7.3.1 Schématisations des élèves : leur cheminement

Du point de vue des élèves, il y a une rupture dans l'activité entre le moment où les élèves travaillent à l'exercice 5D *avant* et *après* l'épisode de négociation avec l'enseignant. Pour évaluer l'hypothèse que cette rupture est liée à l'émergence de la conversation parodique en aval de la conversation, je vais examiner plus en détail la co-construction par les élèves d'une schématisation pour répondre à la question 5D. Nous avons vu dans le synopsis (voir p. 606) que l'activité discursive des élèves sur cet exercice peut être découpée en trois moments :

I. Un premier épisode au cours duquel les élèves travaillent ensemble à la construction d'une solution à l'exercice 5D. Quelle est, à ce moment-là, la schématisation proposée par les élèves pour répondre à la question 5D ? Leur schématisation est-elle conforme à celle du concepteur de la tâche ? Pourquoi les élèves appellent-elles l'enseignant ?

544. La notion de rupture est utilisée ici en référence à un travail de recherche antérieur (Kohler, 2010a), où l'analyse interlocutoire a permis de montrer qu'une rupture dans l'enchaînement conversationnel (un élève systématiquement interrompu et ignoré) peut être liée à une autre rupture intervenant plus tard (il tire la prise de l'ordinateur sur lequel travaille le groupe et supprime ainsi tout leur travail), par le biais d'une frustration prenant son origine dans le processus social de collaboration au sein du groupe.

545. En effet, comme expliqué précédemment, les échanges verbaux médiatisés par des exercices papier-crayon (p.ex. les items du pré-questionnaire) sont abordés comme des pseudo-conversations différées, ce qui permet de considérer avec une perspective de pragmatique conversationnelle les réponses des élèves en tant que *réponses à la question de l'enseignant*. Or, dans le cas de ces exercices papier-crayon, l'initiative de l'échange est du côté de l'enseignant puisqu'il pose une question. Ici, ce sont les élèves qui posent une question.

II. Un deuxième épisode au cours duquel les élèves interagissent avec l'enseignant. Que se passe-t-il lors de cette interaction ? Quels sont les questions des élèves ? Pourquoi les élèves abandonnent-elles leur schématisation précédente pour adopter la solution proposée par l'enseignant ? Y a-t-il quelque chose dans cet épisode qui puisse expliquer l'émergence de la conversation parodique ?

III. Un troisième épisode, entrecoupé de la conversation parodique (les épisodes 3 et 5 du synopsis), durant lequel les élèves construisent leur réponse finale à la question 5D. Quelle est la schématisation finalement adoptée par les élèves ? Que reprennent-elles de leur travail antérieur et de l'interaction avec l'enseignant ? Ont-elles compris ce que l'enseignant leur communique lors de son intervention dans le groupe ? Y a-t-il quelque chose dans cet épisode qui puisse expliquer l'émergence de la conversation parodique ?

La construction d'une solution par le groupe d'élèves durant ces trois épisodes est présentée dans l'ordre séquentiel, en commençant par le premier moment de leur travail sur l'exercice 5D (I), suivi de la négociation avec l'enseignant qui conduit le groupe à abandonner cette solution au profit d'une autre (II), à la suite du deuxième épisode, puis à reprendre celle proposée par l'enseignant (III). C'est à ce moment-là qu'apparaît l'incident critique dont je souhaite reconstruire la micro-histoire, du point de vue des élèves.

Pour reconstruire le point de vue des élèves, je me base sur les interventions orales des élèves pendant tout l'intervalle traitant de la question 5D. Dans le but d'alléger la présentation, seuls des extraits les plus courts possibles des transcriptions sont présentés pour les moments les plus importants de la construction de la schématisation. Les transcriptions complètes des échanges se trouvent en annexe (transcriptions 18, 19, 20, 21 et 22, annexe C, p. 918 et suivantes).

Premier épisode

Au premier épisode, les élèves dessinent la situation avec trois forces (force de soutien, poids et force de frottement), et concluent que seule la force de frottement, parmi les forces qui s'exercent sur la bille pendant son mouvement, détermine son accélération. Elles constatent également que la force de frottement s'exerce en sens opposé au mouvement, et posent l'égalité $-F = ma$, en prenant garde d'écrire le signe "-".

Transcription 6. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 32'

Enregistrement audio

```
1 Aurélie:  non il y a plus rien] c'est moins f est égale à m g
2 Barbara:  est égal à m a
3 Aurélie:  à m a (...)
```

A partir de là, les élèves savent qu'elles doivent trouver l'accélération (Barbara : "il faut l'accélération peut-être là", transcription 18, p. 918, ligne 34). Elles rencontrent quelques difficultés, proposent des

déterminations de l'accélération peu convaincantes[546] (transcription 18, p. 918, lignes 32-40) jusqu'à ce que Sylvie ouvre son formulaire (voir figure 6.34, p. 600) et oriente la conversation sur l'équation suivante : $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$.

A partir de ce moment-là, les élèves sont confrontées à une nouvelle difficulté, parce que les données numériques de l'exercice sont des vitesses et une distance, et la formule de cinématique du *Formulaires et Tables* nécessite de connaître la durée du mouvement (Δt), ce que Sylvie remarque : "mais il n'y a pas de temps justement" (transcription 18, p. 918, ligne 48).

S'ensuit une conversation subordonnée dont l'enjeu consiste à calculer le temps, lors de laquelle les élèves recherchent les ressources dans le formulaire (Sylvie : "on doit prendre une autre formule", transcription 18, p. 918, lignes 52-3).

Elles considèrent que la différence de vitesse sur la différence de temps leur donne l'accélération, ce qui se trouve exprimé dans une expression algébrique de leur *Formulaire et Tables* à la première ligne de la p.159 (voir figure 6.34, p. 600) sous l'intitulé *Vitesse linéaire moyenne*. Les expressions algébriques du formulaires commencent néanmoins par "v_m=..." ou par "l =..." et nécessitent une transformation pour poser "t =..."

Avant d'arriver à la solution algébrique, les élèves proposent des procédures qui n'aboutissent pas. Par exemple, Aurélie propose la règle de trois (Aurélie : "on doit faire le truc de trois", transcription 18, p. 918, ligne 54) mais rencontre une difficulté à établir la correspondance entre les objets discursifs {vitesse finale} (écrit dans la donnée de l'exercice) et {v} (écrit dans le *Formulaire et Tables*). Cette difficulté d'ordre sémiotique tient peut-être au fait que les conventions d'écriture du *Formulaire et Tables* ne sont pas tout à fait connues des élèves et qu'ils en utilisent d'autres en classe. On trouve sur la page 159 du *Formulaire et Tables* les cinq signes suivants dénotant un objet discursif {vitesse}[547] :

— v_m pour dénoter l'objet discursif {vitesse linéaire moyenne} ;

— v ou $\overrightarrow{v}$ pour dénoter l'objet discursif {vitesse instantanée à la fin du mouvement étudié, vitesse au temps t, vitesse finale}[548] ;

— v_1, $\overrightarrow{v_1}$, v_0 ou $\overrightarrow{v_0}$ pour dénoter l'objet discursif {vitesse au temps 1, vitesse au temps 0, vitesse au début du mouvement étudié, vitesse initiale}[548] ;

— v_2 ou $\overrightarrow{v_2}$ pour dénoter l'objet discursif {vitesse au temps 2, vitesse à la fin du mouvement étudié, vitesse finale}[548].

546. Ces déterminations sont peu convaincantes du point de vue des élèves toujours, et c'est l'analyse qui nous permet de l'affirmer, en constatant que ces propositions ne sont pas validées ou reprises par les autres interlocutrices dans l'enchaînement conversationnel.
547. Ils sont reproduits dans l'ordre d'apparition sur la page. Cet inventaire est le travail du chercheur et n'est pas fourni en tant que tel dans l'ouvrage.
548. Cette classe objet a été reconstruite par le chercheur en fonction des usages courants dans le documents et enregistrements du corpus de données.

La conversation leur permet alors de se persuader qu'il est possible de calculer le temps pour la bille de franchir la distance de 100 $mètres$ (Aurélie : "mais si on peut savoir parce qu'on sait qu'elle a une accélération enfin on sait qu'elle roule de trente six mètres par seconde et que au bout de six mètres elle descend à trente mètres par seconde donc on peut savoir qu'en cent mètres combien de secondes elle fait",transcription 18, p. 918, lignes 61-64). Les élèves parviennent à schématiser la décélération de la bille dans leur conversation (Barbara : "au bout de cent mètres elle elle décélère de six mètres" - Aurélie : ben oui j'ai bien compris ça mais tu peux savoir en combien de temps", transcription 18, p. 918, lignes 65-67), mais sans obtenir encore la valeur numérique du temps du trajet de la bille.

Finalement, les élèves réussissent cette opération de transformation de la formule de la *Vitesse linéaire moyenne* en faisant référence, dans la conversation, à une procédure qu'elles ont apprises au cours de leur scolarité (Barbara : "on isole t", transcription 18, p. 918, ligne 90). Elles parviennent à poser $t = \frac{l}{V_m}$.

Elles ne peuvent néanmoins pas encore trouver le temps, ne disposant pas de V_m dans la question 5D, la vitesse moyenne de la bille au cours de son trajet de 100 $mètres$. S'ouvre une nouvelle conversation subordonnée[549] dont la finalité est de trouver cette vitesse moyenne (Aurélie : "non mais ça c'est la différence de vitesse c'est pas ce qu'on recherche sur ces cent mètres elle va faire en moyenne ah", transcription 18, p. 918, lignes 100-101).

Une procédure pour calculer cette vitesse moyenne est proposée plus tard au cours de la conversation (Sylvie : "mais la vitesse moyenne c'est trente six moins trente", transcription 18, p. 918, ligne 113), mais elle n'est pas validée par Aurélie (Aurélie : "mais non", transcription 18, p. 918, ligne 114), qui propose néanmoins exactement la même procédure quelques secondes plus tard (Aurélie : "cent (.) trente six mètres par seconde] après il diminue diminue jusqu'à trente mètres par seconde donc on prend trente trois on prend la moyenne des deux", transcription 18, p. 918, lignes 122-123). Cette proposition est alors validée dans la conversation par toutes les élèves dans les interventions qui suivent, où elles proposent le résultat numérique du calcul proposé :

Transcription 7. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 37' à 38'

Enregistrement audio

```
Barbara: donc t c'est trois virgule
Sylvie:  trois virgule quatre.
Aurélie: trois secondes quoi
         (...)
Sylvie:  attends je veux juste voir quand même
         (...)
Aurélie: je crois qu'on a fait un truc rien à voir là
Barbara: moi aussi je crois
```

549. Aurélie explicite le besoin de revenir à la formule supra-ordonnée, à un moment de la conversation (Aurélie : "c'est quoi la formule de départ", transcription 18, p. 918, ligne 62), besoin qui pourrait s'expliquer par ces trois niveaux hiérarchiques dans l'enchaînement conversationnel. Malgré une structure algébrique relativement simple, l'expression mathématique devient difficile à gérer dans la séquentialité d'une conversation orale.

Quelques secondes après cette solution numérique qui permettrait, en remontant des conversations subordonnées à la question de départ, de fournir une réponse numérique à la question 5D, les élèves émettent des doutes quant à leur réponse. Suite à une brève interaction sur la validité de leur réponse, reproduite ci-dessous (transcription 8), les élèves décident d'appeler l'enseignant.

Transcription 8. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 38' à 39'

Enregistrement audio

```
1  Aurélie: je crois qu'on a fait un truc rien à voir là
2  Barbara: moi aussi je crois
3  Aurélie: non mais pas par rapport à ça mais [rien de
4  Barbara: oui oui] par rapport à (X)
5  Aurélie: lorsque le bille numéro un a une vitesse de deux kilogrammes on devait
6           d'abord commencer par ça on a fait quoi on a rien fait on a juste lu la donnée
7           et on a commencé à faire des calculs rien à voir on devait d'abord regarder
8           ça (.) lorsque la masse truc
9  Sylvie:  mais on a trouvé a
10 Aurélie: on est censé avoir trouvé a et maintenant on sait que
11 Barbara: on peut trouver
12 Sylvie:  moins s égal à deux fois
13 Barbara: je sais pas si c'était juste on demande quoi on peut pas tout faux après
14 Sylvie:  ouais
15 Aurélie: ah oui juste un nonante cinq (.)
```

La figure 6.37 (p. 613) présente une synthèse de la structure conversationnelle de ce premier épisode de la conversation du groupe au sujet de l'exercice 5D. La construction de ce graphe repose sur la proposition de Trognon (1995)[550], qui présente une démarche d'analyse de la structure conversationnelle en tant que phénomène émergent. Elle permet de représenter la structure hiérarchique de sous-conversations de cet épisode. Trognon (1995) souligne la difficulté de la théorie des relations hiérarchiques "n'est pas assortie d'une procédure générale d'assignation des composants directeurs ou subordonnés" (p. 88). Pour assigner les niveaux hiérarchiques aux divers composants de la conversation, je me suis basé sur les finalités explicitées par les élèves et sur la hiérarchie des procédures mathématiques décidées par les élèves. J'ai simplifié le graphe en excluant les interventions individuelles qui ne conduisent pas la conversation du groupe, c'est-à-dire quand elles ne sont pas suivies de reprises dans des énoncés des autres interlocutrices[551].

Les niveaux hiérarchiques sont nommés métaphoriquement "cercle 1" - qui inclut tous les autres cercles - "cercle 2", etc. : cela permet de ne pas les confondre avec le terme "niveau" utilisé dans d'autres usages (p.ex. "niveau d'analyse"), et de signaler la nature méréologique de la structuration présentée - par rapport à d'autres types de hiérarchie - puisqu'il s'agit ici de l'inclusion de *sous-ensembles* construits au fil de la conversation dans un *ensemble* que constitue la conversation elle-même.

550. Nous n'avons cependant pas repris le terme d'*échange*, ni la théorie des *actes de langage*, nous reposant sur la théorie de la communication de Grize qui considère la schématisation, en tant que processus, une co-construction, ce qui rend problématique la théorisation de la communication en tant qu'*échange*, comme l'explique Jacques (1985).

551. Sylvie, par exemple, propose de trouver une autre formule, où il n'y a pas le temps, mais sa proposition n'est reprise par aucune des deux autres interlocutrices et échoue à clore la conversation subordonnée dont la finalité est de trouver le temps.

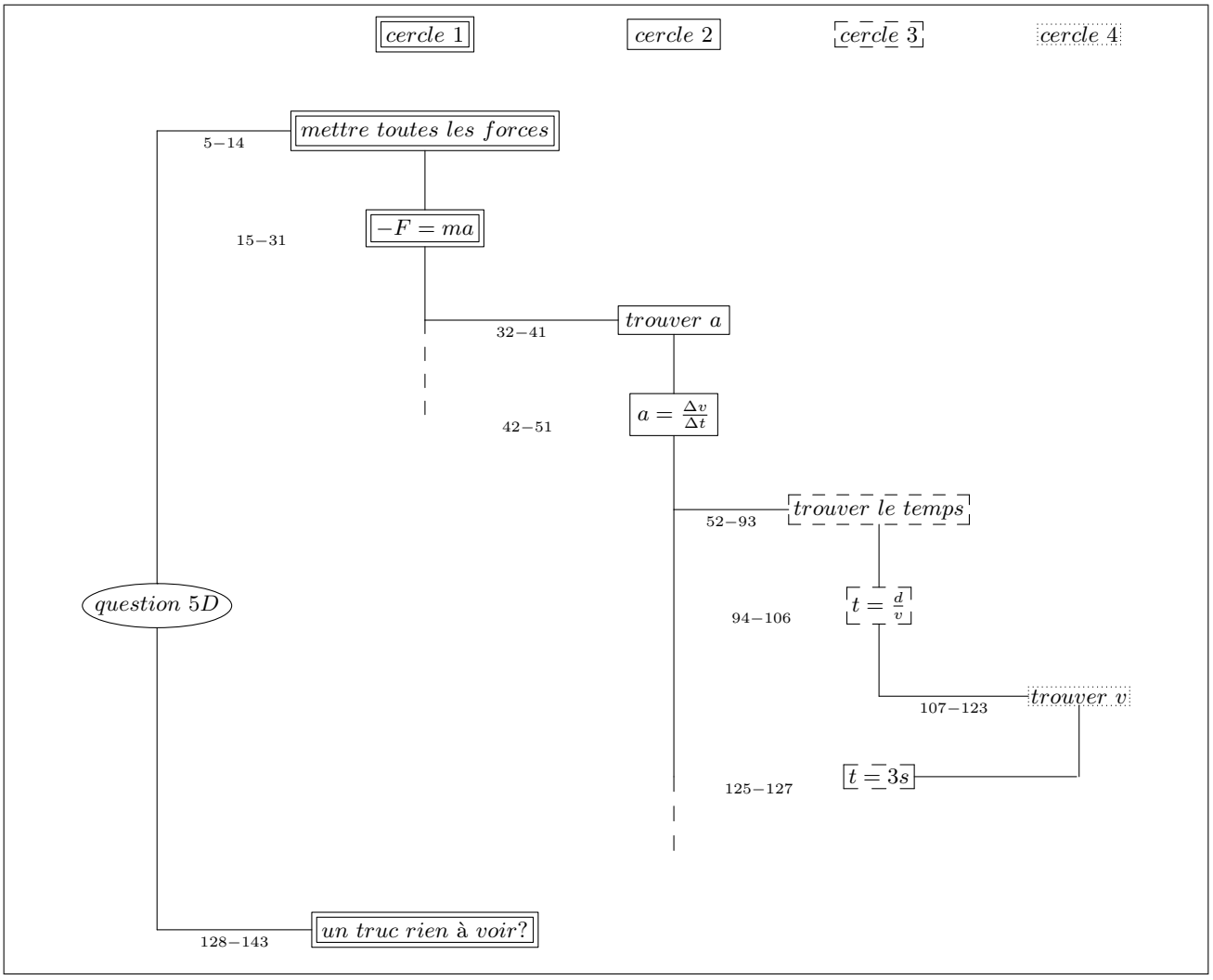


FIGURE 6.37 – Graphe de la structure conversationnelle du premier épisode.

Les numéros indiqués sur le graphe font référence aux lignes de la transcription 18, p. 918 et permettent de se faire une idée de la durée de chacune des parties de la conversation (l'unité de mesure est le tour de parole). Du fait que toutes les interlocutrices ne passent pas forcément d'une conversation subordonnée à une autre au même moment, les indications en nombre de tours de parole demeurent approximatives. Cette représentation de la structure conversationnelle est complétée par la suite.

Deuxième épisode

Au deuxième épisode, les élèves font une demande précise à l'enseignant, que Sylvie énonce pour le groupe : elle porte spécifiquement sur la conversation subordonnée de cercle 3, dont la finalité est de trouver une valeur numérique pour le temps qui quantifie la durée que prend la bille pour parcourir le trajet de 100 $mètres$.

Transcription 9. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 39'

Enregistrement audio

```
1  Sylvie:  on demande (.) monsieur pour trouver l'accélération on sait que que
```

```
2          l'accélération c'est égale à ça [formulaire: v=at+v0]
3  E:      hmm
4  Sylvie: et on a voulu trouver le temps (.) le temps c'est bien d sur v non-
```

Dans les deux énoncés de Sylvie ci-dessus, on voit qu'elle schématise brièvement la structure conversationnelle en présentant la finalité de cercle 2 ("trouver l'accélération"), puis la formule $v = at + v_0$ qui nécessite de trouver le temps, finalité de cercle 3, cercle auquel se situe la question. Au risque d'anticiper sur la suite, je remarque néanmoins d'emblée la difficulté, pour l'enseignant, d'interpréter le sens de la question de Sylvie, qui n'énonce pas les finalités des cercles 2 et 3 et n'exprime pas le cheminement parcouru par le groupe dans son ensemble.

Je ne discute pas ici de la réponse de l'enseignant, cette analyse sera faite ci-dessous pour reconstruire le point de vue de l'enseignant à la schématisation. Je me limite ici, dans un premier temps, à la reconstruction du point de vue des élèves et, dans ce but, présente quelques énoncés parmi ceux qui permettent d'illustrer la réorientation par les élèves de leur schématisation vers une nouvelle finalité. Cette nouvelle finalité initie une nouvelle conversation subordonnée, qui se situe au cercle 2 sur la figure 6.37, et fait remonter les élèves dans les prémisses du raisonnement qui a motivé la question posée.

Le premier énoncé donnant un indice de transformation de la finalité de la co-construction de la schématisation du point de vue des élèves apparaît à la moitié du dialogue (19, p. 921, lignes 47-48), trois minutes plus tard :

Transcription 10. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 42'

Enregistrement audio

```
1  Sylvie: oui mais de toute manière même si on utilise cette formule on a deux
2          inconnues on peut pas on [aura du mal à trouver
```

Dans cet énoncé, Sylvie argumente contre le choix de la formule proposée par l'enseignant en prenant appui sur ce qui constitue la finalité de la schématisation à ce moment-là, de son point de vue : trouver une formule à une seule inconnue.

Vers la fin du dialogue, Barbara et Aurélie adoptent la proposition de l'enseignant et redéfinissent ainsi la finalité de leur schématisation pour la suite du travail :

Transcription 11. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 44'

Enregistrement audio

```
1  Barbara: ah ouais on a la] distance
2  Aurélie: donc en fait on a même plus besoin de calculer avec le temps
3  Barbara: ben c'est la deuxième vitesse
```

Sylvie reprend aussi à sa charge cette finalité quelques secondes plus tard (Sylvie : "ouais (.) ben en tout cas pour calculer on a plus besoin de faire ça puis tu me donnes le (X)", 19, p. 921, lignes 87-88). Cette transformation de la finalité de la schématisation au cours de l'échange avec l'enseignant, et le fait que les élèves n'obtiennent pas de réponse à leur question concernant la manière de trouver le temps, me conduit à considérer cet échange comme une négociation. La négociation porte sur la manière de procéder, plus précisément sur le choix de la formule qu'il faut utiliser.

Dans cette négociation entre les élèves et l'enseignant, celles-ci schématisent finalement très peu ce qu'elles ont déjà construit ensemble dans la conversation précédente, et acceptent d'amorcer une nouvelle sous-conversation au cercle 2, abandonnant la finalité de cercle 3 qui consistait à trouver la valeur pour le temps. Cette nouvelle conversation subordonnée de cercle 2 va se développer au sein du groupe d'élève, après la pause. C'est l'objet du troisième et dernier épisode de la conversation du groupe sur l'exercice 5D.

Troisième épisode

Au troisième épisode, après l'interaction avec l'enseignant et la pause qui a suivi, les élèves amorcent une nouvelle sous-conversation orientée par l'usage de la formule $v^2 = v_0^2 + 2ax$ où x est la distance. Cette formule n'est pas dans le *Formulaires et Tables*, mais se trouve sur une feuille *ad hoc* distribuée par l'enseignant à une leçon précédente. Dès les premiers énoncés après la pause, les élèves font usage de cette formule avec les valeurs de l'exercice 5D, remplaçant v par la vitesse finale et v_0 par la vitesse initiale, ce qui n'est pas clair pour l'une d'entre elles :

Transcription 12. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 56'

Enregistrement audio

```
Aurélie: bon on en était où
         ((rire))
E:       vous continuez s'il vous plaît
Sylvie:  oui (.) alors (..) hum la vitesse initiale c'est trente-six (..)
Aurélie: la vitesse finale c'est [trente
Sylvie:  trente] au carré
Aurélie: non
Sylvie:  ben si (.) V au carré
Aurélie: non (.) faut d'abord mettre la vitesse initiale (.) trente-six au carré
         moins trente au carré (.)
Sylvie:  mais V zéro c'est la vitesse initiale
Aurélie: a:: ouais juste
Sylvie:  est égale [à V fois a
Aurélie: aussi au carré] trente-six au carré
Sylvie:  a: ouais
```

Dans cet extrait, Aurélie adhère à la décision de Sylvie qui consiste à remplacer v par $36\frac{m}{s}$. La suite n'est pas immédiate pour Sylvie, qui s'interroge sur ce que représente le x, et sur la valeur correspondante,

notamment s'il faut là aussi, par analogie avec la vitesse, prendre en compte une distance initiale - valant 0 - et effectuer un calcul de la distance.

Transcription 13. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 56'-57'

Enregistrement audio

```
1  Sylvie: mais après je sais pas si ça c'est quoi? c'est distance
2  Aurélie: la distance c'est cent
3  Barbara: ouais
4  Sylvie: heu (.) zéro moins cent (.)
5  ((rire étouffé))
6  Barbara: non c'est cent (.) la distance
7  Sylvie: voilà(.) bon (.) alors (.) a est égal à
```

Finalement, le groupe se décide pour la valeur de la distance énoncée dans la consigne de l'exercice 5D : 100 $mètres$. La suite de la conversation est l'occasion de se partager trois calculs, effectués sur une calculatrice, que je reproduis ci-dessous en langage mathématique :

$$36^2 = 30^2 + (2 \cdot a \cdot 100)$$

$$a = \frac{36^2 - 30^2}{200}$$

$$a = 1,98$$

La valeur de l'accélération permet aux élèves de remonter à la sous-conversation de cercle 1, et de calculer l'intensité de la force de frottement pour les deux cas présentés dans l'exercice 5D, c'est-à-dire (a) lorsque la bille a une masse de $2kg$ et (b) lorsque la bille a une masse de $50kg$. Les élèves n'ont pas oublié que l'accélération, dans ce problème est une décélération et ajoutent un signe négatif à leur résultat : $a = -1,98\frac{m}{s^2}$. Voici la transcription des échanges où elles expriment leur solution :

Transcription 14. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 58'

Enregistrement audio

```
1  Aurélie: c'est l'accélération de [temps
2  Sylvie:  ça c'est la décélération de un virgule nonante-huit mètre par seconde
3           donc (.) okay ben maintenant il faut trouver h carré
4  Barbara: ouais ben (.) a est égale à moins ça
5  Aurélie: mais oui mais (.) mais c'est une décélération
6  Sylvie:  mais il faut le (.) le prendre en compte alors maintenant (.) on a a est
7           égal à moins trente-deux virgule
8  Barbara: nonante-huit
9  Sylvie:  nonante-huit (...) et maintenant (.) moins f est égal (.) à (..) ici (.)
10          moins f (.) est égal (.) à deux fois (.) un virgule nonante-huit (..)
```

Les élèves peuvent désormais résoudre une équation à une seule inconnue pour produire la réponse à la question de l'exercice 5D, ce qui nous donne en termes mathématiques : $-F = m \cdot -1,98$. Cela

permet aux élèves de calculer la réponse pour les deux cas de l'exercice 5D ci-dessus, après la conversation parodique, au cinquième épisode :a) lorsque la bille a une masse de 2kg : $-F = 2 \cdot -1,98 = -3,96$, donc $F = 3,96N$.b) lorsque la bille a une masse de 50 kg. $-F = 50 \cdot -1,98 = -99$, donc $F = 99N$.

Que peut-on en conclure concernant l'ensemble de l'activité logico-discursive des élèves dans leur co-construction d'une schématisation visant une réponse à la question de l'exercice 5D ?

La figure 6.38 (p. 618) présente une synthèse de l'ensemble[552] des contributions des élèves à la co-construction d'une schématisation répondant à la question 5D, sous la forme d'une structure conversationnelle hiérarchique.

La synthèse sur le graphe de la figure 6.38 permet de montrer que les élèves interrompent et abandonnent leur raisonnement coopératif du premier épisode après avoir interagi avec l'enseignant, et repartent de la réponse schématisée aux cercles 1 et 2, abandonnant la réponse schématisée au cercle 3 du premier épisode.

Une figure plus complète est disponible en annexe (voir figure D.55, p. 978), où le graphe présente les opérations d'*organisation raisonnée* (τ) utilisées par les élèves pour construire l'organisation logique de la conversation et, notamment, sa structure hiérarchique.

J'ai décidé d'ajouter le prédicat avec le connecteur langagier dans l'opérateur τ sur ce schéma, parce que je souhaite montrer quelques nuances dans l'usage de l'opération $\xrightarrow{donc}$: comme Grize (1996) nous y rend attentif, à un connecteur de la langue comme *donc* ne correspond pas une opération τ unique mais plusieurs variantes selon les situations d'interlocution. J'ai donc ajouté ici à la description de l'opération τ ces expressions comme "on a", "il faut", pour tenter de redonner dans l'analyse quelque chose de cet usage singulier et spécifique au contexte de la conversation. Les termes choisis sont néanmoins toujours ceux utilisés par les interlocuteurs.

Au niveau logico-discursif, l'intervention de l'enseignant a pour effet d'invalider l'opération $\tau \xrightarrow{il\ faut\ qu'on}$ produite par les élèves dans leur schématisation, et travaille dans l'interaction précisément le choix de la formule que l'opération τ en question manifeste dans le discours. Il propose une double opération d'articulation, le choix entre (au moins) deux types de formules qu'il distingue par une localisation :

λ : (−, que cette formule utiliser) ⇒ (quand on a MRUA, que cette formule utiliser).

6.7.3.2 Schématisation de l'enseignant

Le point de vue de l'enseignant est reconstruit principalement à partir de la transcription de son intervention dans la conversation des élèves, c'est-à-dire à partir des traces au deuxième épisode (transcription

552. Je n'ai pas inclus dans cette analyse l'interaction avec l'enseignant puisque celle-ci constitue une coordination ou juxtaposition des points de vue des élèves et de l'enseignant, et ne permet pas de décider ce qui est du point de vue de l'un ou de l'autre des interlocuteurs, du moins pas avant d'en faire une analyse plus fine.

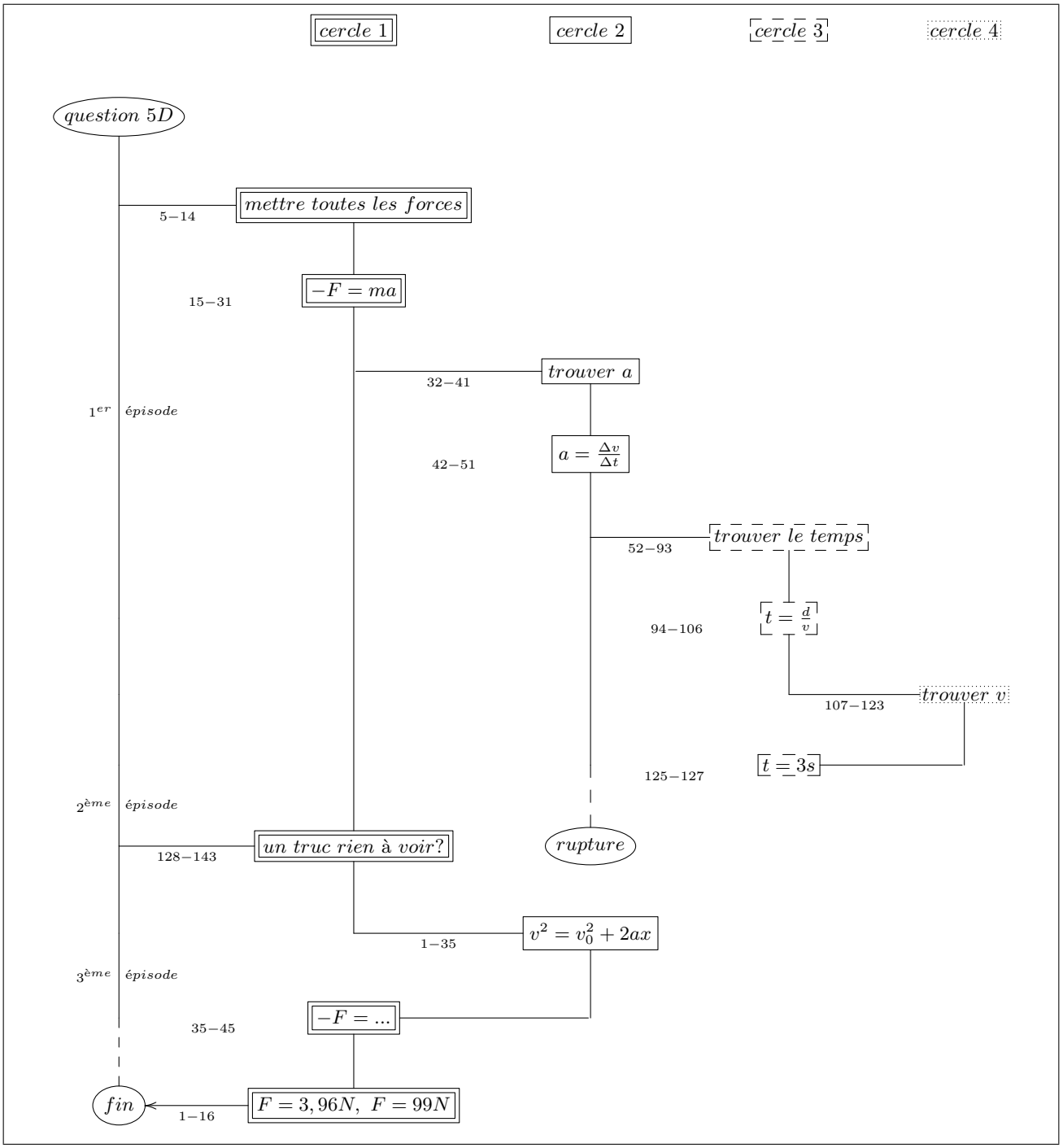


FIGURE 6.38 – Graphe de la structure conversationnelle des trois épisodes.

19, p. 921). Quelques remarques sur le fonctionnement ordinaire des Travaux Pratiques de physique dans l'établissement scolaire étudié complètent les données issues de l'enregistrement des interactions verbales.

L'intervention de l'enseignant est initiée à la demande d'une élève du groupe, Sylvie. L'enseignant ne répond pas à la question posée par Sylvie :

Transcription 15. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 39' à 41'

Enregistrement audio

```
Sylvie: on demande (.) monsieur pour trouver l'accélération on sait que que
        l'accélération c'est égale à ça
E:      mm
Sylvie: et on a voulu trouver le temps (.) le temps c'est bien d sur v non-
E:      attention là vous mélanger des choses (.) celle-là  [v=at+v0] on l'utilise quand
        quand on a M R U A  mouvement rectiligne uniformément accéléré cette formule
        [x=vt+x0] on l'utilise quand quand on a mouvement rectiligne uniforme pas
        accéléré
Sylvie: mais alors comment on fait pour trouver le temps-
E:      on a d'autres formules
```

La pragmatique conversationnelle nous permet de poser l'hypothèse que l'enseignant considère la question non pertinente, puisqu'il ne produit pas une réponse permettant de satisfaire l'acte illocutoire.

La démarche des élève consiste à modéliser le problème comme si il y avait une vitesse constante dans son ensemble pour pouvoir calculer le temps total du trajet (étape 1) et ensuite utiliser ce temps pour répondre à la question de la force en divisant la décélération par ce temps (étape 2). Comme dans l'étape 1 on traite le problème comme si c'était un *mouvement rectiligne uniforme* (MRU) et ensuite on le traite comme un *mouvement rectiligne uniformément accéléré* (MRUA), ce qui conduit l'enseignant à intervenir pour éviter que les élèves confondent les deux[553].

Du point de vue de l'enseignant, l'utilisation de la formule choisie par le groupe ($a = \frac{\delta v}{\delta t}$) est erronée, car en raison de la distinction qu'il fait entre les MRU et les MRUA ("on a deux types de mouvement on doit pas utiliser cette formule là parce qu'il s'agit ici de mouvement rectiligne uniformément accéléré", transcription 19, p. 921, lignes 45-46).

La finalité de la conversation, du point de vue de l'enseignant, consiste à les faire choisir une autre formule (Enseignant : "ou bien exactement où il n'y avait pas le temps alors je vais vous montrer toutes les formules alors qu'est-ce qu'on avait (.) alors maintenant c'est pour R M U A", transcription 19, p. 921, lignes 59-61). Néanmoins, il tente dans un premier temps de faire en sorte que ce soit les élèves qui choisissent la formule pertinente, ce qui est particulièrement explicite lorsqu'il propose aux élèves de regarder l'ensemble des formules dont elles disposent. Cette stratégie pédagogique échoue en raison d'une particularité dans la gestion matérielle des ressources - la formule souhaitée étant écrite sur une autre feuille - et l'enseignant finit par indiquer la formule en question aux élèves (voire l'ensemble de la transcription 19, p. 921).

553. Je reviens plus loin sur l es implications épistémologiques de cette préoccupation de l'enseignant, légitime et bien intentionnée, mais je tiens à faire immédiatement une remarque quant aux savoirs de physique en jeu : ce n'est pas le mouvement qui *est* MRU ou MRUA, ce qui serait une espèce de *naturalisation* du modèle de la physique, mais bien le physicien qui modélise un mouvement comme tel. En ce sens, ce n'est pas gênant de tantôt le modéliser comme MRU et tantôt comme MRUA, tant que l'on sait ce que l'on fait. Cette nuance épistémologique fait toute la différence entre *comprendre* ou *ne pas comprendre* la physique, dans cette situation de malentendu.

Après la présentation séparée des cheminements des élèves et de l'enseignant dans la construction de la schématisation d'une solution à l'exercice 5D, l'analyse se poursuit avec la question de l'*interaction* entre ces points de vue, c'est-à-dire avec la question de savoir ce qui est effectivement partagé dans les schématisations de l'enseignant et des élèves. C'est l'enquête quant à une éventuelle *situation de malentendu*, présentée à la section suivante.

6.7.4 Enquête quant à une situation de malentendu

Nous avons vu que, sur le plan théorique, la schématisation d'une solution à une tâche en milieu scolaire correspond à la co-construction d'une schématisation dont le caractère partagé constitue une finalité pour tous les interlocuteurs. Cette finalité étant en partie surdéterminée par le contexte social des interactions, il nous reste néanmoins par l'analyse à investiguer dans quelle mesure la co-construction en est *effectivement* une, en fonction des indices dont nous disposons à partir des traces à disposition et dans la mesure du possible.

Pour mener cette analyse en respectant le principe d'économie, je contrasterai les points de vue des élèves d'une part, et de l'enseignant d'autre part, en me focalisant uniquement sur ce qui, au cours du processus de schématisation, n'a peut-être pas été partagé (voir le principe méthodologie de la démarche par incident critique expliqué au chapitre 5, section 5.1.2, p. 348 et suivantes). Cette analyse des divergences entre les deux points de vue nous permettra de proposer quelques éléments en faveur de l'hypothèse d'une situation de malentendu. À la fin de la section suivante, je fournirai une description des divergences entre les points de vue à l'aide du langage de la logique naturelle.

6.7.4.1 Première hypothèse : *accord implicite au sujet d'une prétendue erreur*

Je suis à présent en mesure de poser une hypothèse pour l'enquête. La procédure utilisée par les élèves, et celle que l'enseignant leur indique, conduisent à la même réponse, quoique par des cheminements différents. La solution des élèves est par ailleurs identique à celle envisagée par le concepteur de la tâche (voir section 6.7.2.2, p. 599). La demande de Sylvie vise surtout une confirmation permettant de rassurer ses camarades quant à la pertinence du cheminement effectué de manière coopérative jusque là. Sylvie semble elle-même convaincue de la pertinence du déroulement, mais fait face aux doutes d'Aurélie et de Barbara. Or, l'enseignant ne répond pas à sa question, mais à la place aiguille les élèves vers la formule algébrique qui permet de résoudre l'exercice autrement. Il n'interroge pas non plus les élèves sur ce qu'ils ont fait et pourquoi.

À partir de cette observation, je fais l'hypothèse que la procédure de résolution de l'exercice 5D est l'objet d'une situation de malentendu, et que cette situation de malentendu qui n'est ni repérée ni réparée : ni les élèves ni l'enseignant ne semblent remarquer qu'ils construisent une schématisation commune d'une prétendue erreur : l'enseignant et les élèves pensent que la procédure utilisée par les élèves est erronée, alors qu'elle conduit à une réponse identique à la question de l'exercice. Il s'agirait d'une situation malentendu un peu particulière, puisque dans notre enquête nous ne devrions pas établir, comme dans les autres situations,

que les interlocuteurs ont des interprétations divergentes alors qu'ils pensent partager les significations en jeu, mais justement qu'ils s'accordent à penser que le cheminement des élèves est erroné, alors que ce n'est pas le cas.

Si cette hypothèse résiste à l'enquête, je devrais pouvoir montrer que la divergence entre les élèves et l'enseignant quant à la finalité de la conversation, construit une situation de malentendu, qui a des incidences non seulement sur la conversation elle-même - elle conduit à un accord implicite qui oriente le travail des élèves pour résoudre l'exercice 5D - mais aussi sur l'apprentissage des élèves de la physique *en général* : je ferai l'hypothèse d'un lien entre l'image du thème de la conversation (c'est-à-dire *im(T)* dans la théorie de Grize), c'est-à-dire l'image que se font ces élèves de la physique (en tant que discipline scolaire) dans cette situation de malentendu, et l'irruption d'une parodie à la suite de cette conversation.Cette seconde hypothèse repose essentiellement sur l'enchaînement séquentiel des événements, mais aussi sur le contenu du discours parodique produit par les élèves, où l'image qui est schématisée de la physique reprend justement quelques caractéristiques saillantes dans la réorientation du travail des élèves subséquente à l'intervention de l'enseignant lorsqu'il leur indique une autre formule (prépondérance des mathématiques et d'énonciations de "il faut" qui semblent surgir de nulle part).

Avant d'examiner cette seconde hypothèse à la section suivante, j'aimerais pousser l'enquête un peu plus loin concernant la première hypothèse. Comment se fait-il que les élèves - et en particulier Sylvie - soient convaincues d'avoir fait une erreur ? Après tout, Sylvie semble assez sûre de la démarche et, comme je l'ai mentionné plus haut, l'échange avec l'enseignant est plutôt une *négociation* : comment cette négociation tourne-t-elle en faveur de l'enseigant ?

La négociation du second épisode se termine en faveur de l'enseignant sur la base d'un argument concret (Enseignant : "vous avez le petit formulaire que j'ai donné la dernière fois-", Sylvie : "ben pas là non", 19, p. 921, lignes 11-12) : les élèves n'ont pas pensé utiliser la feuille *ad hoc* que l'enseignant leur a mis à disposition, et qui comprend la formule $v^2 = v_0^2 + 2ax$, absente du *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985). Le "petit formulaire" auquel fait référence l'enseignant ici est une feuille reçue lors du cours théorique (voir annexe B, La chute libre d'un corps dans le vide, figure B.31, p. 831).

J'ai eu l'occasion de disposer d'un exemplaire de l'ouvrage du *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985) prêté par une personne ayant été élève du même lycée dix ans auparavant. Dans cet exemplaire du livre, on trouve l'annotation à la main de l'équation manquante (voir figure 6.39, p. 622).

Après analyse, il apparaît que ce qui pourrait sembler n'être que des détails de l'organisation matérielle et sémiotique, joue un rôle particulièrement important dans cette situation de malentendu. En raison des ressources sémiotiques "concrètes" à disposition (livre, polycopié, etc.) les élèves sont prises en flagrant délit d'avoir oublié une formule, qu'elles acceptent alors d'utiliser en lieu et place de leur manière de réfléchir au problème. La mise en faute que constitue cet oubli fonctionne comme un argument qui les fait abdiquer

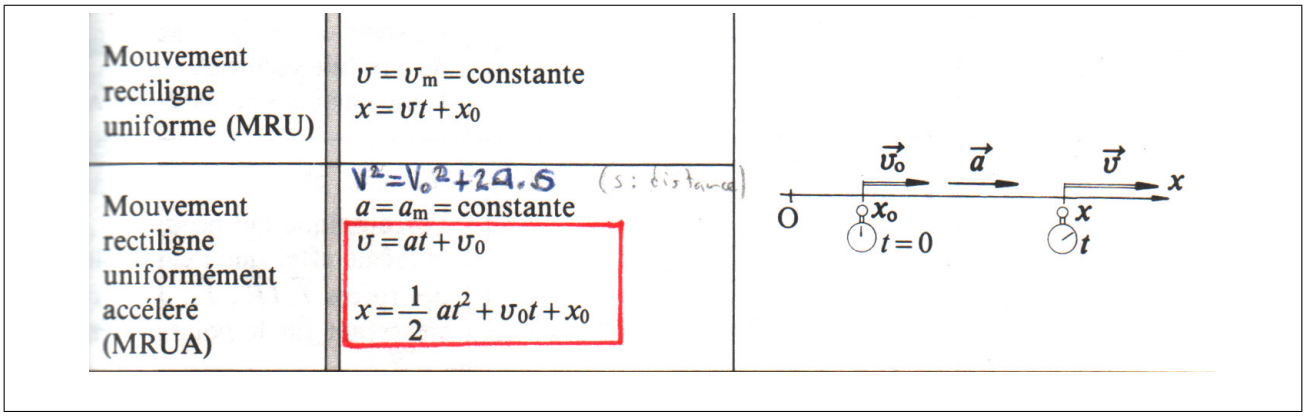


FIGURE 6.39 – Formulaires et tables, extrait de la page 159 annotée.

dans la négociation, et, dans une certaine mesure, dans la réflexion. Cette résolution par un argument reposant sur la prise en faute des élèves quant à leur gestion des ressources sémiotiques concrètes plaide en faveur de l'hypothèse d'un accord implicite sur une prétendue erreur des élèves sans pour autant discuter de cette erreur. Sur le plan interactionnel, les élèves *acceptent* que l'enseignant emporte la négociation (pour avoir été prises en faute), mais sans qu'il n'y ait aucune élaboration explicite de l'erreur elle-même sur le plan cognitif : elles n'*adhèrent* peut-être toujours pas à la pertinence de la distinction entre MRU et MRUA au niveau de la modélisation de l'exercice 5D.

6.7.4.2 Seconde hypothèse : *d'une prétendue erreur à une image dégradée de la discipline scolaire*

Nous avons reconstruit le point de vue des élèves et l'avons mis en contraste à celui du chercheur et de l'enseignant. De cette *confrontation des points de vue*[554], émerge une hypothèse quant au sens que prend l'incident critique au cours des activités scolaires : lors du deuxième épisode de la résolution de l'exercice 5D par le groupe, une négociation s'engage entre Sylvie et l'enseignant sur le cheminement adéquat. Pourtant, les deux cheminements décrits ci-dessus conduisent au même résultat à l'exercice 5D : c'est l'indice d'une situation de malentendu. La négociation tourne en faveur du cheminement de l'enseignant, mais sans expliciter l'erreur que constituerait le cheminement choisi par Aurélie, Barbara et Sylvie lors de leur travail coopératif : l'argument décisif cible la conduite des élèves, leur procédé de travail - le choix d'une formule, le fait de ne pas se référer au "petit formulaire" - et non un argument sur le plan cognitif, portant sur la manière de modéliser le mouvement de la bille à l'exercice 5D.

Je fais ici l'hypothèse que cet échange produit chez les élèves un sentiment "de ne rien y comprendre", qui donne du sens à l'irruption subite d'une conversation parodique dans un groupe d'élèves studieuses : les élèves mettraient en scène le caractère incompréhensible de la discipline scolaire - la physique - dans une parodie parce qu'elles viennent tout juste de vivre ce sentiment de ne rien y comprendre, ici et maintenant,

554. Au sens cognitif où l'utilisait Piaget, mais aussi au sens social puisque ces points de vue sont pris en charge par des personnes et situés dans des activités particulières. À cette dimension socio-cognitive de la confrontation des points de vue, il faut ajouter qu'elle est envisagée ici comme portant sur des *objets de discours* et non sur des *objets concrets* (verres, liquides, pâte à modeler...) ou des catégories abstraites (quantité, longueur...), comme c'est le cas dans certains travaux de l'équipe piagétienne.

et plus précisément encore parce qu'elles n'ont pas été comprises au moment de l'échange avec l'enseignant : leur cheminement, pourtant long et de structure relativement complexe, ne fait l'objet d'aucune élaboration au cours de cet échange. Il est simplement mis de côté pour une erreur de conduite : le choix de la formule, et l'usage du "petit formulaire". Or, le sentiment de comprendre une matière d'enseignement comme la physique se construit forcément à l'occasion de processus de communication singuliers et situés, lors de boucles rétro-actives de vérification à travers les échanges, dont la pragmatique conversationnelle décrit le processus de validation au cours d'un minimum de trois tours de parole (voir p.ex. : Trognon & Larrue, 1988b).

A partir de la première hypothèse, je propose ainsi une seconde hypothèse, complémentaire à la première et prenant appui sur celle-ci : le catalyseur [555] de la conversation parodique est le sentiment *de ne rien y comprendre* provoqué à l'occasion du travail sur l'exercice 5D, qui précède l'épisode parodique : quand bien même les élèves s'étaient engagées dans un raisonnement personnel qui permettait de trouver la réponse correcte, elles l'ont abandonné après leur demande de vérification à l'enseignant, et se sont repliées sur un calcul à l'aide d'une formule désignée par l'enseignant. A cette rupture dans l'activité logico-discursive correspond aussi un changement de tâche cognitive, puisque les élèves ne font plus autre chose que d'utiliser une formule algébrique dans les épisodes trois et cinq qui "entourent" la conversation parodique, au lieu des raisonnements de la schématisation du premier épisode. L'activité de résolution qui a suivi l'intervention de l'enseignant dans le groupe implique surtout une élève, qui se charge du calcul. Elle délègue certains calculs intermédiaires aux autres mais on voit apparaître de courtes digressions dans la conversation. En effet, elles ne sont pas impliquées dans une tâche collective exigeante comme lors du raisonnement effectué au premier épisode, où elle construisent de manière coopérative un cheminement pour la résolution du problème. Ce raisonnement est désormais un travail effectué par l'enseignant, puisqu'il a désigné la formule à utiliser : Aurélie et Barbara adoptent alors pour l'occasion une rôle de presse-boutons en entrant les chiffres dans la calculatrice, que Sylvie leur dicte pour les faire participer.

En ce sens, l'enchaînement conversationnel de la situation de malentendu a des conséquences sur l'apprentissage des élèves, dans cette situation surtout au niveau de la nature de l'activité cognitive qui consiste à *faire de la physique* : s'agit-il de choisir la bonne formule (ou de se la faire désigner par l'enseignant), ou d'entrer dans un raisonnement complexe visant une modélisation ? Dans le premier épisode, l'activité cognitive du groupe est plutôt de l'ordre de la résolution de problème et de la modélisation, alors qu'après l'intervention de l'enseignant les élèves font usage d'une formule arithmétique choisie par l'enseignant pour ne laisser qu'une seule inconnue. Cette résolution induit la valorisation d'un apprentissage procédural plutôt que la valorisation d'un apprentissage conceptuel, qui reposerait sur le sens que prennent les choix de modélisation effectués par les élèves. Autrement dit, l'enjeu conversationnel quant à la finalité de l'échange entre l'enseignant et Sylvie - choisir la bonne formule, pour lui, et vérifier leur cheminement, pour elle - se reporte sur le sens de la tâche, voire sur le sens que prend la physique en tant que discipline scolaire. Au vu de cette analyse, il paraît tout à fait cohérent que ces élèves, par ailleurs studieuses et concentrées sur leur travail, s'engagent dans une parodie qui leur permet de faire de la nature de la tâche cognitive l'objet

555. Pour l'usage de ce concept en psychologie, voir Cabell et Valsiner (2014).

même de leur moquerie, en faisant la part belle, dans leur parodie, aux mathématiques et aux procédures dont le sens leur échappe.

6.7.4.3 Énonciation des divergences selon les points de vue

La seconde hypothèse établit un lien entre un premier incident critique, plus discret, qui consiste pour les élèves à abandonner leur cheminement lors de la résolution de l'exercice 5D après une négociation avec l'enseignant, et le second incident critique qu'est la parodie, plus facilement repérable et qui m'a amené à découvrir le premier. Selon cette hypothèse, c'est une situation de malentendu lors du premier incident critique qui a conduit les élèves à s'engager dans une conversation parodique lorsqu'elles reprennent le travail après la pause, portées par une dynamique socio-affective courante en milieu scolaire : investies du sentiment de *ne rien y comprendre*, les élèves ont pris du plaisir à construire une conversation parodiant la physique et son langage difficile, pour inverser la responsabilité interlocutoire de l'incident critique. Le fait de devoir abandonner leur cheminement n'est pas "de leur faute" [556] - indice d'un manque de compétence ou d'intelligence - mais "de la faute" à la physique en tant que discipline scolaire, qui serait incompréhensible. Poser l'hypothèse d'une *situation de malentendu* permet une position intermédiaire par rapport à ces deux positions, grâce à la prise en compte de l'échelon situationnel. En effet, pour le sens commun, la responsabilité est soit placée à l'échelon individuel (c'est l'élève ou l'enseignant qui est incapable), soit centrée sur un objet (ici "la physique", dans une réification de la discipline scolaire qui n'a, pourtant, guère de sens sur le plan épistémologique). Or, notre analyse montre que la parodie de la physique qu'énoncent les élèves, indice d'une image dégradée de la discipline scolaire, procède d'un sentiment de ne "rien y comprendre" qui se construit dans une interaction sociale où la responsabilité n'est pas seulement partagée entre les individus : elle émerge même du processus de communication lui-même, et en particulier du fait que ni les élèves, ni l'enseignant ne s'intéressent effectivement au cheminement de pensée de l'autre : ils viennent avec leurs finalités personnelles dans l'échange, et ne s'ajustent pas à celles de leurs interlocuteurs. Le rapport de force qui découle de ces postures débouche sur une négociation qui n'est pas résolue *sur le fond*, dans une argumentation centrée sur le problème de physique, mais par un artifice de la relation asymétrique en l'enseignant et les élèves : les élèves n'ont pas utilisé une des ressources mise à disposition par l'enseignant, le "petit formulaire", et se trouve en flagrant délit de rupture de contrat didactique, ce qui les enjoint à accepter la solution de l'enseignant sans poser de questions. Si la négociation est menée avec succès par l'enseignant, elle constitue néanmoins une occasion manquée par rapport aux enjeux et objectifs d'apprentissage.

556. J'utilise délibérément une expression locale familière pour exprimer ici ce qui constitue un cheminement de pensée courant du point de vue des élèves, étant donné la menace pour l'identité qu'exerce le milieu scolaire sur les individus lors de la prise de risque que constitue l'engagement dans des activités d'apprentissage dans un contexte institutionnel où l'évaluation joue un rôle prépondérant (voir p.ex. : Butera, Buchs, & Daron, 2011).

6.7.5 Discussion

6.7.5.1 Commentaire #1 : approche par situation ou par concept

Les liens éventuels qu'entretient cette situation de malentendu avec la précédente (*le poids de mots*, situation de malentendu #5, section 6.6, p. 563 et suivantes) méritent d'être relevés, même s'il s'agit d'un commentaire dont je n'ai pas les moyens de faire une discussion argumentée reposant sur des traces spécifiques. L'exercice 5D traite effectivement d'une question assez proche de celle de l'item #4, dont nous avons analysé les tentatives d'explication de Barbara et Sylvie à Aurélie, qui en fait la demande. La situation de malentendu #6 permet de remonter en amont de la précédente dans le cours de la séquence, pour le même groupe d'élèves.

L'exercice 5D porte, comme l'item #4, sur une situation-problème mettant en scène des objets abandonnés dans un mouvement sur une surface horizontale. Dans l'exercice 5D, la seule force exercée sur les objets à prendre en considération pour obtenir l'intensité de la somme des forces permettant de définir l'accélération est, comme pour le deuxième moment de l'item #4, la force de frottement. Pour les deux exercices, deux masses différentes sont comparées, quoique avec des questions différentes : à l'exercice 5D, les élèves doivent trouver l'intensité de la force de frottement, alors qu'à l'item #4 elles doivent estimer si les chariots arrivent en même temps. Nous avons vu, néanmoins, que lorsque l'item#4 est abordé selon les attentes du modèle enseigné, ces deux questions nécessitant pratiquement le même cheminement.

Au moment de travailler à l'exercice 5D, Aurélie, Barbara et Sylvie ont déjà répondu à l'item #4 individuellement, mais n'ont pas encore eu l'occasion d'échanger sur leurs réponses, l'activité Digalo et l'activité expérimentale ayant lieu plus tard. Pourtant, les trois élèves parviennent à co-construire une schématisation complète pour résoudre cette situation-problème, ce qu'elles ne parviendront pas à faire plus tard au cours de la séquence, du moins pas dans une réponse consensuelle au niveau du groupe, puisque Sylvie termine seule le rapport expérimental après l'incident critique analysé à la situation *le poids de mots*. La seule étape qu'elles n'effectuent pas consiste à remonter les cercles des sous-conversations imbriquées pour produire le résultat chiffré. Comment se fait-il alors que ces élèves s'embrouillent lors de leurs explications (voir analyse de la situation #5) bien plus tard dans la séquence ? Il n'y a évidemment pas de réponse simple à une telle question. J'aimerais cependant souligner quelques pistes de réponse, qui me paraissent complémentaires les unes des autres.

Sur le plan affectif, on peut évidemment faire l'hypothèse que l'épisode analysé dans cette situation de malentendu a un impact important sur les élèves : le découragement prend d'ailleurs la forme de cette conversation parodique qui a attiré mon attention sur cette situation d'interlocution, que je n'aurais sinon même pas remarqué dans le corpus de traces. Les élèves ont probablement perdu une partie de leur confiance en elles, d'autant plus qu'elles se trouvaient déjà dans une posture fragile, comme nous l'indique le fait qu'elles font vérifier leur solution par l'enseignant alors que tout va bien.

Sur le plan cognitif, la divergence entre la façon d'aborder le problème qu'opère l'enseignant lors de son interaction avec le groupe d'élèves et la schématisation co-construite par les élèves qui précède cette intervention rappelle, à bien des égards, la divergence de finalité que j'ai mise en évidence dans la situation #5. En effet, l'enseignant a une approche par les situations, opérant une double localisation (λ) semblable à ce que proposera Barbara dans son explication à la situation #5 : "attention là vous mélanger des choses (...) celle-là on l'utilise quand quand on a MRUA (...) cette formule on l'utilise quand quand on a mouvement uniforme pas accéléré". Il convient d'ajouter que cette double localisation, comme elle est produite par l'enseignant et qu'aucune explication n'est donnée, relativement au contenu des expressions mathématiques, sur les raisons de cet usage différencié en fonction d'une situation de type MRUA ou MRU, la double localisation n'a pas un statut de stratégie de résolution de problème, mais *constitue* plutôt les savoirs enseignés eux-mêmes : les élèves apprennent *que* dans ce cas, il faut utiliser telle formule, et n'apprennent pas à modéliser le mouvement soumis à un frottement.

Du moment que les élèves peuvent se contenter de se souvenir des formules à utiliser en fonction de ces localisations pour réussir, du moment que l'enseignant ne leur demande rien d'autre, cette approche procédurale relève de la définition même des savoirs enseignés. En effet, sur le plan épistémologique, elle ne constitue pas simplement une astuce ou stratégie que l'on donnerait aux élèves, puisque de leur point de vue, ce sont les savoirs eux-mêmes qui reposent sur des opérations de localisation relatives aux types d'exercice, du moment que l'enseignant ne leur donne rien d'autre pour réfléchir à cet exercice.

Or, je l'ai déjà souligné à l'occasion de l'analyse de la situation de malentendu précédente, cette approche procédurale est évidemment pertinente dans la discipline, en physique, en ce sens qu'elle fait partie du travail de modélisation, dans lequel le physicien examine les conditions de validité des outils intellectuels dont il dispose. Néanmoins, lors de l'intervention de l'enseignant que nous observons ici, il y a *naturalisation* explicite du modèle et non pas *modélisation* : l'enseignant schématise en faisant référence au modèle comme si c'était une réalité dans le monde, et non en tant que langage, système de signes, permettant de produire un discours sur une réalité qui, il faut bien l'admettre, échappe toujours au moins un peu à la modélisation qu'en fait le physicien. En effet, l'énoncé "on a MRUA" traite le modèle (MRUA) comme une *propriété* du mouvement considéré, et non comme un *modèle* au sujet de ce mouvement, que l'on choisit en fonction de sa question et - c'est toujours le cas ! - pour aller au plus simple... Ce principe d'économie, fondamental à la démarche scientifique qui s'intéresse à des problèmes trop complexes pour faire autrement, est d'ailleurs rarement énoncé en classe.

Autrement dit, la façon dont l'enseignant schématise MRU et MRUA dans son intervention implique que c'est le mouvement qui *est* MRU ou MRUA, au lieu de schématiser explicitement le travail de modélisation du mouvement des billes dans l'exercice 5D en tant que tel, en présentant comme un choix le fait de le considérer ici comme un mouvement MRU ou MRUA. Il en résulte un déni de la nature épistémologique de *modèle* au modèle et, du coup, les élèves n'y comprennent plus rien, et se contentent d'appliquer la procédure indiquée par l'enseignant. Bref, elles se contentent d'obéir et renoncent à comprendre.

Ainsi, l'approche procédurale ne s'oppose pas ici à l'approche par les concepts uniquement en terme de stratégie de résolution de problème d'une part, et de réflexion à partir du modèle théorique d'autre part. En fait, les deux approches pourraient très bien être utilisées en complémentarité, et contribuer à l'apprentissage des élèves, si elles étaient utilisées conjointement. Cependant, l'approche procédurale schématisée par l'enseignant, en laissant dans l'implicite le travail de modélisation, *transforme* les savoirs enseignés, du fait qu'elle est utilisée *seule*[557] et ne permet pas aux élèves de faire le lien avec une approche conceptuelle, où le processus de modélisation est explicite.

Pour finir, notons que Barbara a non seulement (compris et) repris cette approche par les situations en proposant son explication en double localisation un peu plus tard dans la séquence pour l'item #4, mais elle a également saisi l'enjeu de modélisation de la physique, puisqu'elle énonce dans la parodie que "cela dépend de ce que l'on cherche". Elle a par contre renoncé à construire et utiliser des *concepts* de manière suffisamment rigoureuse pour qu'elle dispose des outils intellectuels pour procéder aux choix importants dans le travail de modélisation et, quand elle s'y essaie, elle manque de repères explicites[558] pour entrer dans ce travail. Cela ne l'empêchera peut-être pas d'obtenir des performances scolaires suffisantes, mais son apprentissage effectif de la physique reste de l'ordre d'un *faire semblant*.

6.7.5.2 Commentaire #2 : une tâche conçue par le chercheur

Vu que l'exercice 5D a été conçu par le chercheur, on pourrait légitimement se poser la question de savoir si cela n'a pas joué un rôle dans la construction d'une situation de malentendu. Ce commentaire propose un bref examen de cette question : la situation de malentendu n'a-t-elle pas lieu entre le chercheur, concepteur de la tâche, et l'enseignant, qui la comprend autrement, *via* les élèves ?

Pour examiner cette question, je me suis intéressé à la question de savoir si l'exercice est inhabituel pour les élèves, par rapport aux activités proposées par leur enseignant. Cet exercice est effectivement légèrement inhabituel pour les élèves, sous certains aspects. Dans la conversation du groupe, plusieurs indices vont dans ce sens. Par exemple, Aurélie s'attend à devoir ignorer la force de frottement alors que l'exercice demande justement de la calculer :

Transcription 16. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 30'

Enregistrement audio

```
1 Sylvie: donc] on a juste moins f est égal à m a (.) non il n'y a pas de force de
2         traction ou (.)
3 Aurélie: je sais pas ils disent pas qu'on néglige la force par hasard de
4         frottement
```

557. On retrouve ici l'immense différence, sur le plan éducatif, entre un ordre donné à un enfant qui *explicite* les raisons qui fondent l'acte d'autorité en même temps qu'il *exige* l'obéissance, et l'ordre qui exige d'obéir sans comprendre et ne s'explique pas : dans ce dernier cas, l'acte d'autorité enseigne surtout, et souvent à l'insu du parent ou de l'éducateur, à renoncer à comprendre, et fabrique ce qui passera plus tard pour un "manque d'intelligence", une forme d'*idiotie induite* par des interactions sociales qui obligent à renoncer à la curiosité naturelle et à la construction du sens auquel s'adonne tout être humain, s'il est libre de penser.

558. À la situation #5, par exemple, son concept de *poids* est si vague qu'on y retrouve des schèmes d'action d'une *force* ($\pm$*être exercé sur*) mais aussi d'une masse($\pm$*tomber directement*) et de la modélisation en tant que telle ($\pm$*tenir compte*).

```
5 Barbara: non il faut justement la [trouver
6 Aurélie: ah] attends je peux relire moi parce [là
7 Barbara: ouais]
```

Un peu plus tard dans la conversation, Aurélie trébuche sur l'expression "vitesse instantanée" et ensuite utilise la loi de la somme des forces (F=ma) en l'appliquant directement à l'accélération des objets en chute libre (F=mg), alors qu'il ne s'agit pas ici d'une telle situation :

Transcription 17. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 31' à 32'

Enregistrement audio

```
1 Barbara: mais est-ce qu'on a une force qui est la même
2 Aurélie: instantané ça veut dire quoi-
3 Barbara: c'est au moment ouais à un moment donné à à zéro je pense au début quoi
4          (.) mais là (.) c'est juste le truc là comment il y a encore une force là-
5         dessus sur [la
6 Aurélie: non il y a plus rien] c'est moins f est égale à m g
7 Barbara: est égal à m a
8 Aurélie: à m a (...)
```

Dans cet extrait, Aurélie part du cas particulier que constitue la chute libre, et c'est Barbara qui corrige l'expression "f est égale à m g" (ligne 6) en f "est égal à m a" (ligne 7), reprise par Aurélie qui valide ainsi cette précision (ligne 8). Que le raisonnement d'Aurélie parte du cas particulier de la chute libre pour retrouver la loi de la somme des forces n'est pas anodin, car dans l'analyse de la chute libre les forces de frottement sont ignorées (par définition de *libre*), soit qu'il s'agit du frottement de l'air dont l'influence est faible par rapport à la force de gravitation dans un mouvement vertical, soit que l'on étudie un système sous vide ou dans l'espace. Mais la loi de la somme des forces a un champ d'application plus large, qui inclut les mouvements à l'horizontale[559] où, typiquement, la force de frottement est proportionnellement plus importante pour déterminer le mouvement des objets, et nécessite d'être modélisée pour éviter la représentation contrefactuelle d'un mouvement qui se poursuit à l'infini.

Les élèves sont bien amenés à s'adapter un peu, lors de l'exercice 5D, mais nous avons vu (p. 609 et suivantes) que la lecture du Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie (1985) demande au moins autant d'adaptations quant au langage utilisé, tant verbal que mathématique (p.ex. "v_m" pour la vitesse linéaire moyenne, qui n'est pratiquement jamais nommée ainsi en classe). Je ne pense donc pas que la situation de malentendu puisse s'expliquer par les petites différences constatées, à savoir :

— le fait de faire calculer la force de frottement au lieu de l'ignorer ;

— l'expression "vitesse instantanée" ;

— les attentes des élèves quant à devoir réfléchir à une situation de chute libre, alors que ce n'est pas le cas.

559. Ou, plus précisément, les mouvements perpendiculaires à la force de gravitation.

En outre, le fait de traiter le mouvement comme un Mouvement Rectiligne Uniforme pour en extraire la vitesse moyenne, quand bien même le mouvement est accéléré (MRUA), est une simplification tout à fait acceptable au niveau des résultats chiffrés. Un travail plus explicite sur la modélisation aurait permis, là aussi, d'en faire un sujet de conversation explicite dans l'objectif d'un apprentissage du fonctionnement des modèles en physique.

6.8 Situation #7 : *attention, une flèche peut en cacher une autre...*

6.8.1 Résumé

Au fil des activités de la séquence, les élèves et l'enseignant s'engagent fréquemment dans une pratique dénommée "dessin des forces". Or, les pratiques du *dessin des forces* en classe varient grandement les unes des autres, non seulement dans les productions des élèves, mais aussi dans les documents et écritures de l'enseignant. Cette diversité pose le problème de l'interprétation des *dessins des forces*, et présente le risque d'une diversité d'interprétations dans la construction des connaissances par les élèves. Cette observation m'a conduit à considérer la diversité même des pratiques du *dessin des forces* comme un incident critique. Cet incident critique se démarque cependant de ceux traités jusqu'ici en ce qu'il n'est pas situé à un moment précis des échanges entre élèves et enseignant, ni spécifique à un exercice ou une tâche particulière, mais se diffuse à la séquence dans son intégralité, et probablement au-delà [560]. À partir de cet incident critique diffus, je tenterai de répondre à la question de savoir si des situations de malentendu émergent autour de la pratique du *dessin des forces*, en discutant des traces disponibles.

La reconstruction des points de vue de l'enseignant et des élèves permet de montrer le détail de la diversité des pratiques, et d'inférer quelques règles de l'utilisation du *dessin des forces*. Vu la grande diversité tant du point de vue de l'enseignant que des élèves dans cette pratique, l'enquête quant à une situation de malentendu part de deux échanges entre élèves et enseignant où la diversité des pratiques peut être abordée dans des traces discursives. Ces échanges ont été choisis pour aborder la pratique du *dessin des forces* explicitement, l'analyse des esquisses ne permettant pas la reconstruction du sens que prend le dessin es forces selon divers points de vue.

Si l'analyse permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu pour chacun des échanges analysés, elle soulève surtout de nombreuses questions sur la pratique, du dessin des forces. En particulier, l'analyse permet de distinguer les divergences à trois niveaux différents : les règles d'action de l'esquisse d'une illustration, la procédure et la panoplie des forces acceptées en physique. Ces questions sont reprises dans la discussion, qui aborde quelques enjeux didactiques de la pratique du dessin des forces. Vu la complexité de cette pratique, et l'outillage focalisé sur le discours que j'ai choisi pour cette recherche, l'analyse et les commentaires présentés dans cette situation de malentendu contribue à soulever une problématique plutôt qu'à fournir des hypothèses expliquant les difficultés des élèves.

6.8.2 Présentation de l'incident critique

6.8.2.1 Présentation de la tâche : le *dessin des forces*

Le dessin des forces est une pratique transversale à diverses tâches, et qui intervient souvent comme un moment de la procédure de résolution des situations-problèmes utilisées dans la séquence. Je ne présente

560. J'étendrai occasionnellement l'analyse au-delà de la séquence enregistrée en audio-visuel, lorsque je dispose de traces écrites utiles.

ici les objectifs et la procédure du dessin des forces que de manière générale, indépendamment d'une tâche particulière, puisque l'incident critique a justement pour objet la diversité de cette pratique d'un usage à l'autre.

Le dessin des forces comprend une esquisse de l'objet sur lequel s'exercent les forces, à partir de laquelle on trace une flèche pour chaque vecteur représentant une force exercée sur l'objet, en prenant soin de la positionner dans l'angle pertinent relativement à l'objet esquissé. Le dessin des forces est particulièrement utile lorsque plusieurs vecteurs sont représentés, ce qui permet de rapporter les uns aux autres, voire de d'opérer une "somme" de vecteurs à l'aide des outils de la trigonométrie.

Dans le corpus des traces récoltées, on trouve notamment des dessins des forces à l'occasion de tâches pour lesquelles il est utile ou nécessaire de connaître la somme des forces en faisant usage de la loi de la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F} = m \cdot \overrightarrow{a}$). Dans cet objectif, le dessin des forces permet de prendre en compte la direction et le sens des vecteurs représentant les forces pour déterminer le sens, la direction et éventuellement l'intensité du vecteur représentant la somme des forces ($\sum \overrightarrow{F}$).

Dans le livre de référence de la classe, le *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985), il n'y a pas d'illustration directement assimilable au dessin des forces permettant l'usage des outils de trigonométrie suggéré ci-dessus. L'entrée présentant la somme des forces n'est pas illustrée, et c'est l'illustration des forces de frottement (voir figure 6.40) qui fournit l'exemple le plus proche de la pratique de la classe du dessin des forces.

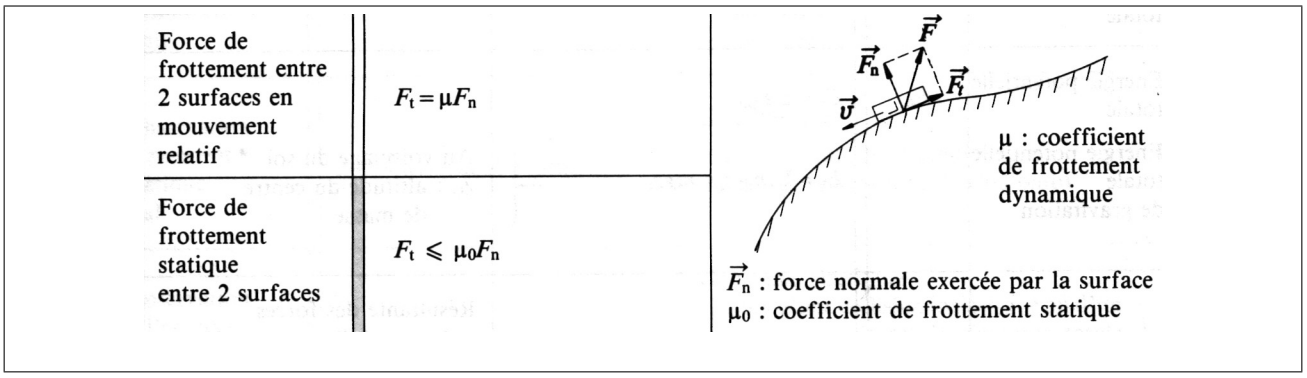


FIGURE 6.40 – Illustration des forces de frottement (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985, p. 163).

L'illustration reproduite par la figure 6.40 (p. 632) représente un objet qui glisse le long d'une pente ondulante, et le carré dessiné par la "force normale exercée par la surface" ($\overrightarrow{F_n}$) et la "force de frottement" ($\overrightarrow{F_t}$) permet de déterminer l'angle d'une somme des forces[561] ($\overrightarrow{F}$). Pourtant, la force de gravitation n'est pas représentée sur cette illustration, et les longueurs des flèches ne sont pas prises en compte pour la détermination de l'angle et de la longueur de la flèche représentant la somme des forces.

561. $\overrightarrow{F}$ n'a aucune légende sur le schéma, mais est couramment utilisé comme synonyme de $\sum \overrightarrow{F}$.

En conclusion de ce rapide examen du livre de référence, il apparaît que le dessin des forces ne dispose pas d'une présentation qui lui est spécifique. En outre, le *Formulaires et tables* (Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, 1985) contient de nombreuses illustrations avec des flèches qui ne désignent pas des forces, mais autre chose. Si elles représentent souvent un vecteur, ces vecteurs représente tantôt une accélération, une vitesse ou encore autre chose. Les esquisses comprenant des flèches, prises dans leur généralité, ne disposent pas non plus d'une présentation spécifique dans le livre de référence. Pour reconstruire les normes et les attentes du dessin des forces, nous ne disposons donc que des pratiques de la classe.

6.8.2.2 Présentation des réponses escomptées

Cet incident critique n'étant pas spécifique à une tâche, et je ne peux donc pas en fournir les réponses escomptées comme je l'ai fait pour les autres situations. Quelles sont les traces permettant de reconstruire les points de vue des interlocuteurs ? Les supports de cours et enregistrements de la séquence étudiée ne contiennent aucune consigne explicite sur le dessin des forces. Il est probable que l'enseignement de cette pratique repose sur l'imitation par les élèves de dessins des forces exécutés par l'enseignant devant les élèves, et qu'il s'agit d'une pratique dont les normes et critères ne sont justement pas explicites.

À la place de l'analyse des réponses escomptées à une question précise, je fournis ci-dessous un exemple plus convaincant que celui du livre de référence (cf. figure 6.40) de ce que l'usage du dessin des forces permet aux élèves de faire pour réussir les tâches qui leur sont déléguées. La figure 6.41 (p. 634) présente la consigne d'un exercice qui exige des élèves la maîtrise du dessin des forces, et l'extrait d'une production d'élève [562].

Cet exemple a été choisi parce qu'il s'agit d'une tâche où l'élève doit prendre en compte les angles entre les vecteurs des forces exercées sur un objet, et que la production de cette élève a été signalée par l'enseignant comme constituant un exemple de réussite. Il s'agit néanmoins d'un exemple issu d'une production d'élève hors de la séquence étudiée, dans la partie du cours *Travail et énergie*. L'élève utilise le dessin des forces dans cet exercice pour déterminer la valeur de l'angle de la route sur laquelle glisse le chariot en $degré$, en partant de l'indication en $pourcentage$ de la consigne ("l'inclinaison moyenne est de 6%"), et pour déterminer les angles des forces relatifs à la route. Ces angles lui permettent ensuite de déterminer le *travail* (W) effectué par chacune des forces, comme demandé par la consigne.

En ne considérant que les opérations effectuées par l'élève sur le dessin, je distingue trois couches successives à l'esquisse de l'élève, représentée de manière incrémentale par la figure 6.42 (p. 634).

Aux trois couches du dessin des forces présenté par la figure 6.42 correspondent les opérations suivantes de l'élève sur l'esquisse :

562. L'extrait comprend l'esquisse de l'élève et la légende, mais sans inclure l'ensemble des opérations mathématiques, car cette production écrite de l'élève est uniquement présentée dans le but d'illustrer l'usage escompté du dessin des forces dans les pratiques scolaires de cette classe.

(a) Consigne.

Exercice 3:

Une voiture de 1.3 *tonnes gravit une montagne en parcourant* 35 *km sur une route dont l'inclinaison moyenne est de* 6 *%. Le véhicule grimpe à vitesse constante et il subit une force de frottement constante de* 200 *N.*

Calculez le travail de chacune des forces qui agissent sur la voiture.

(b) Extrait de la réponse écrite d'une élève.

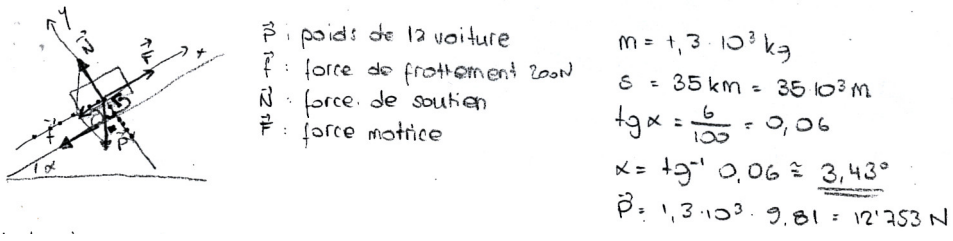


FIGURE 6.41 – Consigne et dessin des forces effectué par une élève sur son polycopié de cours, "Travail et énergie" (voir p. 841).

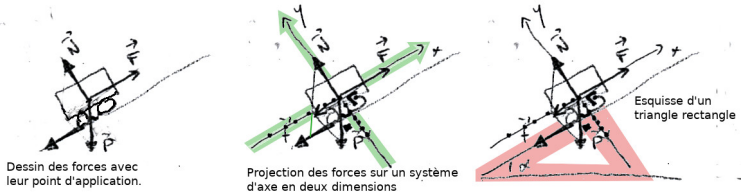


FIGURE 6.42 – Découpage en trois étapes par modification de l'esquisse de l'élève présentée à la figure 6.41.

— l'élève place des flèches sur l'esquisse, représentant les vecteurs des forces exercées sur l'objet ;

— l'élève place un système d'axes bidimensionnels (l'axe x dans le sens du mouvement) ;

— l'élève esquisse un triangle à partir des axes et du sol (perpendiculaire à la force de gravitation $\overrightarrow{P}$), de manière à pouvoir poser l'angle α, qui est l'angle entre la route et l'horizontale.

Ce dessin des forces permet à l'élève de déterminer les angles entre les vecteurs représentant les diverses forces en présence, en plaçant ces vecteurs sur le triangle esquissé à la troisième étape (par des translations imaginaires). Pour cela, l'élève a besoin de l'angle déterminant la pente de la route sur laquelle glisse le chariot. La consigne fournit une valeur en % pour cette pente. Pour déterminer ces angles en $degré$, l'élève pose l'angle α et le calcul par trigonométrie, en imaginant les 6% de la pente dans un autre triangle rectangle, où le côté opposé à l'angle α vaut 6 et le côté adjacent 100. Ce triangle, qui n'est pas tracé par l'élève, est présenté à la figure 6.43 (p. 635) par un surlignage coloré ajouté par l'auteur.

Les deux dernières actions listées se font à l'aide d'un calcul en langage mathématique, et notamment des opérations de trigonométrie, lorsque l'angle entre les vecteurs représentant des forces particulières sont

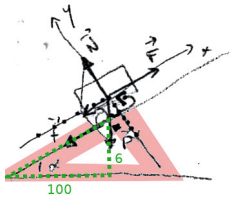


FIGURE 6.43 – Triangle imaginé sur l'esquisse de l'élève présentée à la figure 6.41.

différents de 0°, et 180° (dans ce dernier cas, enseignant et élèves peuvent se contenter de changer le signe de l'intensité de la force particulière).

Cette brève présentation d'un usage escompté du dessin des forces permet de fournir un point de repère pour la description d'un incident critique. Il convient néanmoins de garder à l'esprit que l'usage précis escompté du dessin des forces peut varier d'une tâche à l'autre. Je ne m'intéresse ici au dessin des forces effectué par cette élève pour répondre à cet exercice qu'en tant qu'illustration conforme d'une pratique dont je vais à présent montrer la diversité des usages. Ensuite, il s'agira justement d'inférer les normes implicites malgré la diversité constatée, et de se poser la question d'une éventuelle situation de malentendu à l'aide de l'analyse.

6.8.2.3 Présentation des traces

Où et quand des dessins des forces apparaissent-ils dans le corpus ?

Dans les situations de malentendu précédentes, nous avons déjà rencontré à plusieurs reprises le dessin des forces. Dans la situation de malentendu #1 *la Lune est en chute libre*, Pauline produit un dessin des forces au sujet duquel je n'ai relevé aucune difficulté (voir figure 6.44) : le dessin est soigné, la légende est précise et le nom des forces va jusqu'à mentionner en indice le corps qui exerce la force et celui sur lequel la force est exercée ($\overrightarrow{F_{21}}$ désigne le vecteur de la force exercée par le corps 2 sur le corps 1).

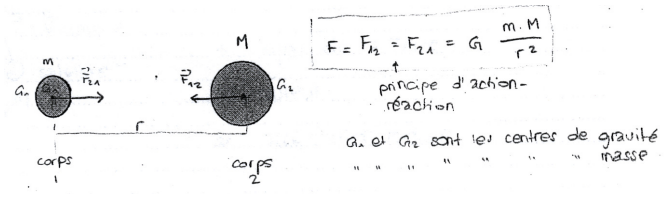
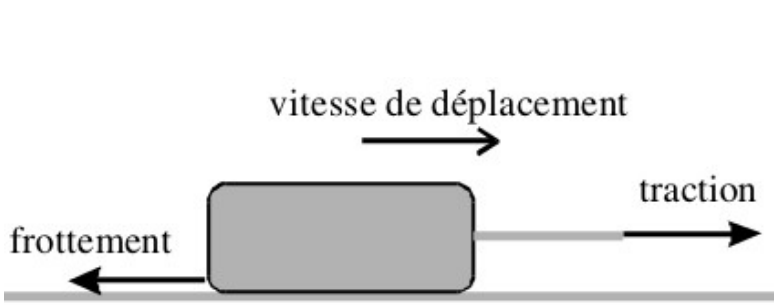


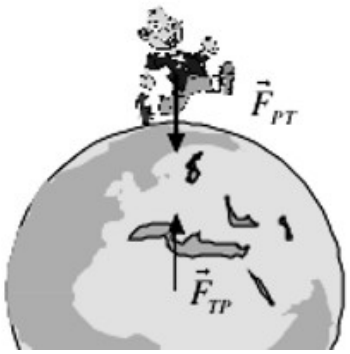
FIGURE 6.44 – Dessin des forces de Pauline rencontré lors de l'analyse de la situation de malentendu #1.

Dans la situation de malentendu #2 g *comme gravité*, nous avons observé un dessin des forces esquissé au tableau noir par l'enseignant (voir figure 6.49, p. 640). Les légendes des flèches représentant les vecteurs sont plus sommaires. Nous y reviendrons.

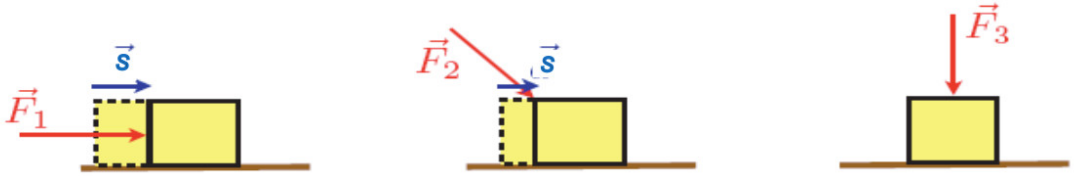
Les polycopiés de cours distribués aux élèves comprennent diverses pratiques du dessin des forces, reproduites dans la figure 6.45 (p. 636). Ces exemples montrent une hétérogénéité au niveau des forces représentées sur les esquisses, et sur la manière de les placer, de les esquisser et de les nommer.



(a) Dessin des forces dans le polycopié de cours, "les lois de la dynamique" (annexe B.33, p. 854.)



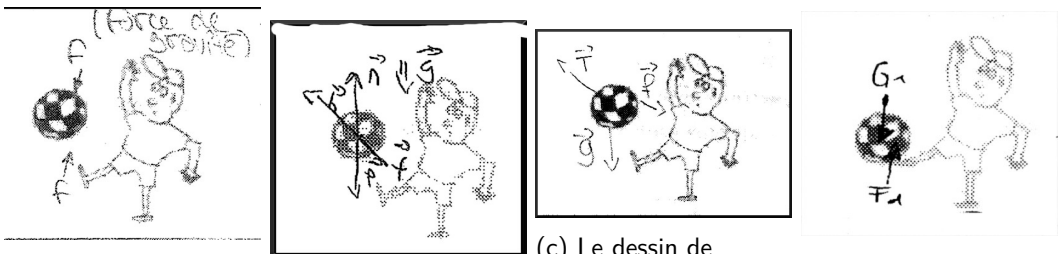
(b) Dessin des forces dans le polycopié de cours, "les lois de la dynamique" (annexe B.35, p. 865.)



(c) Dessin des forces dans le polycopié de cours, "travail et énergie" (voir p. 841).

FIGURE 6.45 – Divers dessins des forces dans les polycopiés de cours distribués aux élèves par l'enseignant.

Du côté des productions d'élèves, j'observe également une diversité de pratiques du dessin des forces quant aux forces inclues sur les esquisses selon les situations, à la manière de les placer, de les esquisser et de les nommer. La figure 6.46 (p. 636) reproduit quelques exemples des variations constatées, toutes empruntées aux productions des élèves à l'item #3 du pré-questionnaire (voir figure B.17, p. 818 pour la consigne), qui permettent de se faire rapidement une idée de cette diversité.



(a) Le dessin d'Annette.

(b) Le dessin d'Alain.

(c) Le dessin de Cassandra.

(d) Le dessin de Daniel.

FIGURE 6.46 – Divers dessins des forces dans les productions des élèves à l'item #3 du pré-questionnaire.

Malgré la diversité qu'illustrent ces exemples, des caractéristiques communes à tous ces dessins et habituelles dans cette classe peuvent déjà être relevées. Il semble que le dessin des forces est notamment l'occasion de :

— décider des forces exercées sur l'objet en dessinant une flèche pour chaque vecteur représentant une force singulière ;

— déterminer la direction et le sens de ces forces, en dessinant les flèches conformément ;

— opérer une somme des vecteurs représentant les forces incluses dans le dessin en prenant en compte les angles entre les vecteurs, et dans certains cas l'intensité de ces vecteurs.

L'incident critique est la diversité observée quant aux autres caractéristiques de ces dessins des forces. Cette diversité est présentée dans la prochaine section (6.8.3), en distinguant la diversité observée (1) entre les dessins de l'enseignant et (2) entre les dessins des élèves. Je me baserai sur les productions de l'enseignant et des élèves de dessins des forces pour reconstruire les normes implicites de cette pratique, de manière à fournir une description précise des divergences constatées. Les rares traces disponibles où les échanges entre élèves ou entre élèves et enseignant portent spécifiquement sur cette pratique seront utilisées dans un deuxième temps, à la section suivante (section 6.8.4), pour se poser la question d'une éventuelle situation de malentendu.

L'analyse permettra de discuter l'hypothèse d'une situation de malentendu pour rendre compte de la diversité constatée, en la mettant en compétition avec d'autres explications possibles, comme celle consistant à attribuer des difficultés précises aux élèves que l'on ne retrouve pas chez l'enseignant, ou encore à considérer la diversité constatée non problématique pour l'exercice des activités de physique. Je retiendrai l'hypothèse d'une situation de malentendu si l'analyse permet de montrer que les élèves et l'enseignant divergent quant au sens qu'ils donnent à leurs pratiques du dessin des forces, et que les schématisations des élèves constituent des reprises, quoique modifiées, des schématisations de l'enseignant.

6.8.3 Reconstruction des schématisations selon les points de vue

Comme l'incident critique tient à la diversité des pratiques, la reconstruction et comparaison des points de vue effectuée dans cette section ne vise pas dans un premier temps l'identification de divergences spécifiques entre la schématisation de l'enseignant et celles des élèves, mais plutôt la présentation d'une palette de pratiques diverses du dessin des forces de manière à montrer l'étendue de cette diversité. Les exemples présentés ci-dessous ont été choisis en sélectionnant parmi toutes les traces disponibles celles qui permettent de montrer un maximum de diversité, en évitant de présenter deux pratiques semblables.

Dans un premier temps, je montrerai la diversité des dessins des forces du point de vue de l'enseignant, c'est-à-dire dans ses propres productions et dans les documents qu'il distribue aux élèves. Dans un second temps, je montrerai une diversité de dessins des forces en sélectionnant quelques exemples parmi les productions des élèves. La comparaison se fait dans une discussion orientant l'attention sur ce qui varie

dans les traces présentées, et sur ce qui semble plutôt partagé par tous les interlocuteurs. Ce qui ne varie pas dans les pratiques me permettra de reconstruire les normes du dessin des forces de cette classe. Je m'appuierai sur les résultats de ce travail pour discuter l'hypothèse d'une situation de malentendu, à la section suivante (section 6.8.4), sur ce qui varie d'un dessin des forces à l'autre.

6.8.3.1 Schématisations de l'enseignant

Du point de vue de l'enseignant, je vais présenter quatre extraits : deux tirés du polycopié de cours, et deux dessins des forces esquissés au tableau noir.

Le premier exemple est un dessin des forces présenté en illustration à la première loi de Newton (loi de l'inertie) au début du chapitre *Les lois de la dynamique*. L'illustration est reproduite ci-dessous par la figure 6.47 (p. 638), et la page complète du polycopié est fournie en annexe (figure B.33, p. 854).

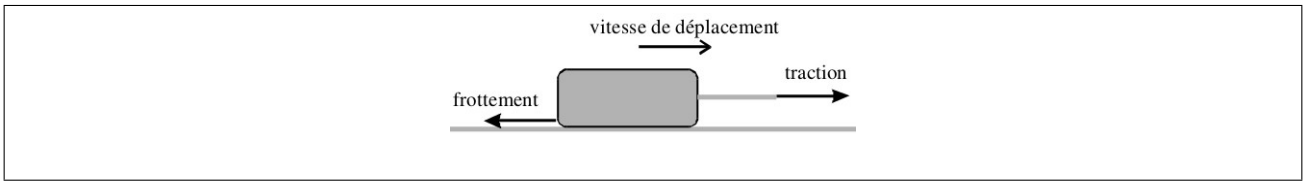


FIGURE 6.47 – Illustration de la loi de l'inertie, ou *principe d'inertie*.

La tâche d'interprétation des élèves de ce dessin se confronte à une première difficulté, qui consiste à interpréter les flèches en tant que signe utilisé dans un contexte précis. Autrement dit, l'objet illustratif "flèche" peut jouer plusieurs *rôles sémiotiques* (Kohler, 2014a ; Kohler & Chabloz, 2017) : parfois utilisé pour attirer l'attention sur une partie de l'illustration, comme déictique, les flèches jouent également fréquemment le rôle de signifiant dénotant un vecteur. C'est le cas ici. Cependant, le vecteur lui-même est un objet mathématique - un objet discursif - dont la *connexion* (Grize, 1996) avec un référent réel reste à identifier, lors de l'interprétation de la flèche. Dans le contexte de la classe de physique, la flèche désigne parfois une force, mais aussi une vitesse, une accélération ou encore autre chose.

Dans l'illustration reproduite par la figure 6.47, on trouve effectivement sur le même dessin des flèches désignant diverses grandeurs physiques. Une force désigne une vitesse, dont la légende est explicitement "vitesse de déplacement". Au niveau illustratif, cette flèche désignant une vitesse est placée au-dessus de l'objet en mouvement esquissé, alors que les deux autres flèches partent des bords de l'objet. La flèche "frottement" dénote également un vecteur, et désigne une force. Il est plus difficile de déterminer ce que dénote la flèche intitulée "traction". Elle pourrait dénoter un vecteur, et désigner une force, mais elle pourrait aussi être comprise comme l'illustration d'une corde qui tire l'objet, et désigner le sens du mouvement sans pour autant dénoter un vecteur force. Cette deuxième interprétation rendrait néanmoins redondante la flèche placée au-dessus de l'objet tiré, qui désigne aussi, implicitement, le sens du mouvement en désignant la vitesse de l'objet.

Le deuxième exemple est un dessin de force présenté en illustration à une série d'exercices proposée à la fin du chapitre *Les lois de la dynamique*. L'illustration est reproduite ci-dessous par la figure 6.48 (p. 639), et la page complète du polycopie est fournie en annexe (figure B.35, p. 865.

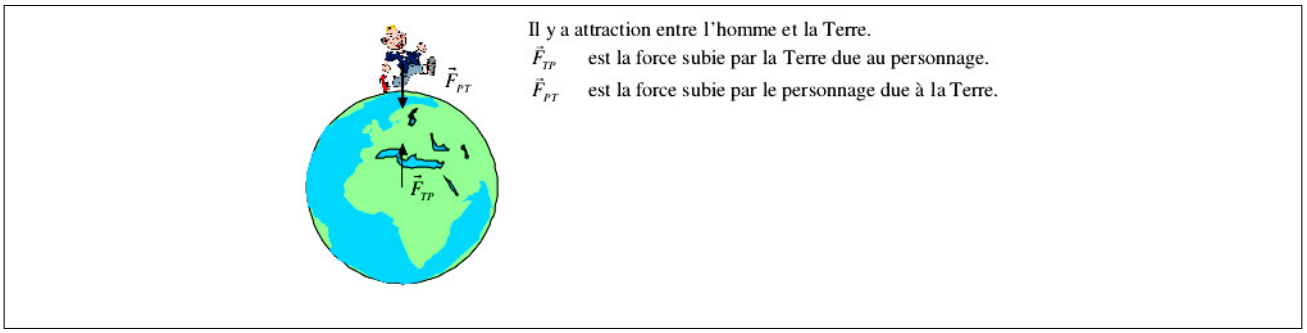


FIGURE 6.48 – Un dessin des forces présenté dans le polycopié de cours.

Dans ce dessin, les vecteurs représentant les forces sont dénommées $\overrightarrow{F_{TP}}$ et $\overrightarrow{F_{PT}}$, l'indiçage présentant une double référence à (1) l'objet qui "subit" la force, et (2) l'objet auquel la force est "due", c'est-à-dire pour l'exemple de la figure 6.48 "T" pour la "Terre" et "P" pour le "personnage". Le *rôle sémiotique* de cet indiçage correspond, dans l'expression discursive du concept de force, à spécifier les classes-objets qui remplissent les deux places libres du prédicat $\pm exercer$ (sur •, par •). En effet, dans le modèle enseigné, une force est toujours *exercée sur* une masse *par* une autre masse. Dans l'illustration (figure 6.48), les objets ne sont pas seulement nommés par des classes-objets (en l'occurrence {Terre} et {personnage}), mais également représentées sous forme de dessins figuratifs.

Les flèches dénotant les vecteurs sont placées sur ces dessins de manière analogue à la façon dont en remplit les places libre du prédicat par des objets discursifs. Cependant, le placement ne pose pas les mêmes problèmes en langage verbal que sur le dessin. L'usage du langage verbal se fait essentiellement par un arrangement syntaxique, séquentiel, et le choix des prédicats. Au lieu du prédicat à deux place $\pm exercer$ (sur •, par •), la légende du dessin de la figure utilise deux prédicats à une place : $\pm subir$ (par •) et $\pm être\ dû$ (à •). Cette séparation en deux prédicats indépendant ne reprend pas la bidirectionnalité de $\pm interagir$, également utilisé dans le discours accompagnant l'illustration.

Par contre, dans la pratique du dessin des forces, il n'y a pas de syntaxe. Les vecteurs sont des objets du langage mathématique qui n'ont justement pas de position définie. Le langage illustratif d'un dessin des forces pose le problème du placement des vecteurs uniquement du fait de les dessiner [563] : tracer une flèche oblige à la placer *quelque part* sur l'esquisse. Dans l'illustration reproduite par la figure 6.48, les flèches représentant des vecteurs sont placées sur le dessin avec pour origine le centre de gravité de l'objet sur lequel s'exerce la force, et avec une orientation de la flèche indiquant la direction et le sens des vecteurs (les uns relativement aux autres). Le placement de l'origine des flèches au centre de l'objet diffère de celui du premier exemple, que nous avons observé à la figure 6.47.

563. Au sens strict, il n'est pas possible de $\pm dessiner\ un\ vecteur$: c'est un abus de langage. Cette expression langagière est néanmoins fréquemment utilisée dans la classe.

En outre, nous pourrions nous attendre à ce que la longueur des flèches représente la valeur scalaire des vecteurs, l'intensité de la force. Cependant, cela nécessiterait de définir une échelle de mesure, ce que je n'ai jamais observé dans l'ensemble du corpus. Dans bien des cas, l'intensité des forces n'est pas importante pour l'exercice demandé aux élèves. Dans d'autres cas, le dessin des forces est utilisé sans une quantification de l'intensité des forces, parce qu'elle n'est justement pas encore connue au moment d'effectuer le dessin des forces. L'intensité de l'une des forces, ou de la somme des forces, fait l'objet de la question et il serait en effet embarrassant de devoir tracer une flèche à une longueur précise en fonction d'une échelle avant de connaître la réponse au problème posé, le dessin des forces ayant justement pour fonction de fournir une aide pour réfléchir au problème.

En plus des usages du dessin des forces dans le support de cours, j'ai trouvé deux exemples d'usage par l'enseignant dans le corpus lorsqu'il écrit au tableau noir. Lors de la correction de la situation-problème #1, l'enseignant effectue un dessin des forces au tableau noir, reproduit ci-dessous par la figure 6.49 [564].

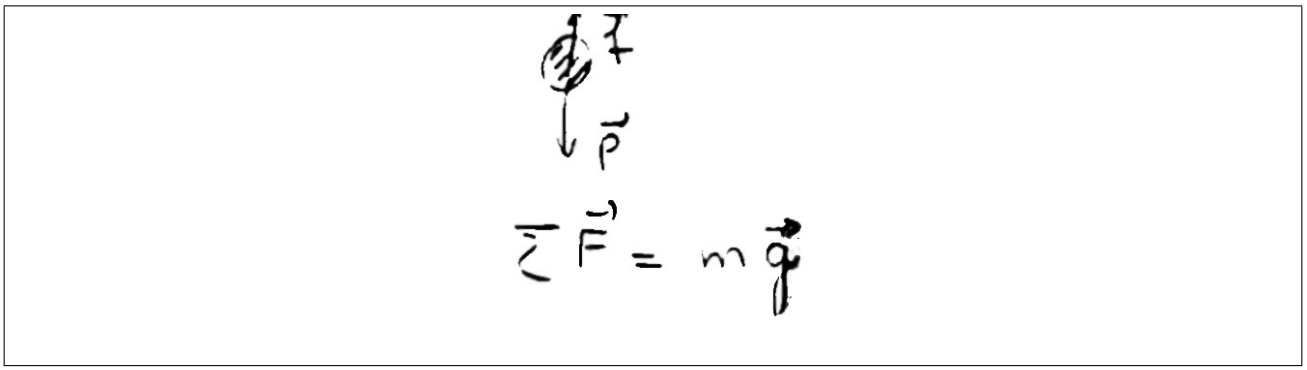


FIGURE 6.49 – Le dessin des forces présenté au tableau noir pour la correction de la situation-problème #1.

Ce dessin comporte un cercle pour représenter une balle, et deux flèches pour représenter les deux vecteurs des forces qui s'exercent sur la balle dans le cas de la chute libre, à savoir :

— la force exercée par la Terre sur la balle ("$\overrightarrow{p}$" sur le dessin) ;

— la force exercée par l'air sur la balle ("$\overrightarrow{f}$" sur le dessin).

Dans son usage du dessin des forces, l'enseignant a adopté des conventions avec ses élèves, sans doute pour aller plus vite ou pour simplifier la présentation, de telle sorte que les deux forces ne sont pas nommées avec un indice faisant référence aux deux objets en interaction, comme dans le cours théorique, mais sont plus simplement nommées "$\overrightarrow{f}$" pour la force de *f*rottement, c'est-à-dire la force exercée par l'air sur la balle, et ("$\overrightarrow{p}$" pour la force de gravitation exercée par la Terre sur la balle, autrement dit le *p*oids de cette balle. Les flèches représentant les vecteurs sont placées avec le centre de gravité de la balle pour origine.

Pourtant, l'enseignant ne place pas toujours les flèches de cette manière. Par exemple, dans la correction de l'item #2, deux forces s'appliquent sur la surface de la balance qui ne sont pas dessinées sur la balance,

564. Les teintes noire et blanche ont été inversées pour faciliter la lecture.

ni même l'une sur l'autre, mais côte-à-côte. Ce dessin des forces au tableau noir est reproduit ci-dessous par la figure 6.50.

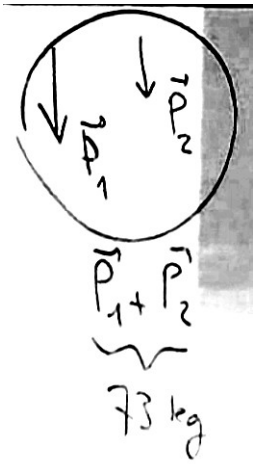


FIGURE 6.50 – Inscription au tableau noir par l'enseignant pendant la correction de la posture a) de l'item #2 à la phase 5 de la séquence.

Pourquoi l'enseignant prend-t-il des libertés avec le placement des flèches dans ce dessin ? Placer les flèches avec pour origine le centre du cercle dessiné aurait conduit à la superposition de deux flèches allant dans la même direction et le même sens, ce qui est difficilement lisible. Le rôle sémiotique des flèches sur le dessin des forces est de représenter des vecteurs. Or, comme nous l'avons vu ci-dessus, les vecteurs n'ont pas de position définie dans l'espace. Lors de la correction de l'item #2, c'est surtout la décision d'inclure ou non la représentation d'une force dans le dessin qui est importante, puisqu'il ne s'agit pas de faire une somme des forces pour répondre à cette situation-problème.

Ces quelques exemples suffisent à montrer que l'usage du dessin des forces par l'enseignant dans les documents écrits du support de cours et au tableau noir, présente une diversité de formes, notamment selon l'objectif de la situation d'interlocution particulière dans laquelle ce dessin est utilisé. Ces objectifs sont incrémentaux : il s'agit toujours au moins de définir les forces pertinentes, celles qui s'appliquent sur l'objet, mais le calcul d'une somme des forces n'est pas toujours exigé par la tâche, par exemple. Le dessin des forces n'est pas seulement un dessin, du point de vue de l'enseignant, c'est aussi une procédure [565]. Lors des corrections des items #1 et #2 dont il est question ci-dessus, cette procédure est sensiblement la même, et comprend plusieurs phases, que je résume ci-dessous :

— une première phase, orientée vers la prise de décision des forces à inclure au dessin, qui prend la forme d'une réflexion à haute voix dans le discours de l'enseignant, durant lequel il n'hésite pas à ajouter des forces qu'il élimine ensuite, de manière à expliciter un raisonnement dont l'enjeu consiste surtout à ne pas oublier une force importante ;

565. Il s'agit d'une procédure de modélisation (Winther, 2006) illustrée, même si elle n'est jamais explicitement présentée comme telle aux élèves dans cette classe.

— une deuxième phase, orientée par le dessin d'une flèche pour chacune des forces, dont il faut décider de la direction et du sens (le point d'application étant arbitraire), flèche qu'il s'agit également de nommer (au minimum par une lettre, comme $\overrightarrow{p}$ pour le vecteur $poids$) ;

— une troisième phase, à nouveau orientée vers la prise de décision et la réflexion, mais cette fois *à partir du* dessin des forces, et qui conduit éventuellement à la décision de négliger certaines forces selon leur intensité (négligeable) ou leur direction (typiquement, lorsque les vecteurs sont perpendiculaires ou d'égales intensité, comme $\overrightarrow{p}$ et la force normale de soutien d'une surface $\overrightarrow{n}$) ;

— une dernière phase, mais seulement s'il s'agit d'estimer l'intensité de la somme des forces, qui met éventuellement en œuvre des transformations des intensités des forces dans une réflexion ancrée sur le dessin effectué, et mobilisant des opérations algébriques ou trigonométriques.

À partir de ces quelques exemples, et sans prétendre à la moindre exhaustivité, je peux dégager quelques *règles d'action* de l'usage du dessin des forces du point de vue de l'enseignant :

— la force ou somme des forces est représentée par une flèche, qui dénote un vecteur et désigne une force ou la somme des forces ;

— le vecteur est dénoté par un signe placé à côté de la flèche correspondante, selon la convention de la physique ($\overrightarrow{F}_{objet\ objet}$) ou d'autres conventions propre à la classe ou à l'établissement scolaire ;

— le point de départ de la flèche se place sur le centre de gravité de l'objet si le dessin le permet, sinon (superposition, etc.) ailleurs ;

— la direction et le sens est indiqué par le segment de la flèche et sa pointe, qui désignent la direction et le sens dans laquelle la force s'exerce sur l'objet ;

— la longueur du segment de la flèche ne représente pas l'intensité de la force, car celle-ci est souvent une inconnue au moment du dessin des forces, ou alors le dessin manque d'une échelle de mesure pour faire correspondre la longueur du segment à une quantité de $Newton$.

En plus de règles d'action, le dessin des forces repose sur une panoplie de forces existantes [566] permettant de répondre à la question de la première phase de la procédure énumérée ci-dessus : quelles sont les forces dont il faut tenir compte ? Pour répondre à cette question lors d'un dessin des forces particulier, l'enseignant passe en revue la panoplie au complet, toujours identique, en posant la question pour chaque force si elle est pertinente dans le cas considéré ou non. Pour tenter de représenter cette panoplie, je propose ci-dessous la liste des forces couramment utilisées dans la pratique de la classe étudiée :

— le $poids$, ($\overrightarrow{P}$), autrement dit la force de gravitation exercée par la Terre sur l'objet analysé, dont la direction et le sens sont toujours orientés vers le "bas", ou plus précisément vers le centre de la Terre ;

566. Ce statut de force *existante* a suscité de nombreux débats dans l'histoire de la physique, et tout particulièrement à l'époque de Newton (Koyré, 1966, 1968) à la suite de sa proposition d'introduire une nouvelle force dans la panoplie, la force de gravitation : une force invisible, exercée à distance, et dont nul - pas même Newton - n'avait idée de ce qu'elle est véritablement.

— la $force\ de\ soutien$, ($\overrightarrow{s}$), autrement dit la force de réaction exercée par un solide (le plus souvent le sol) en contact avec l'objet, dont la direction et le sens correspondent à une perpendiculaire [567] à l'orientation du sol ou solide en question ;

— la ou les $forcesdefrottement$, ($\overrightarrow{F_f}$), autrement dit des forces exercées par l'environnement (air, sol, autre objet au contact) sur l'objet analysé, dont la direction est identique à la direction du mouvement de l'objet et le sens inverse à celui du mouvement ;

— la $force\ motrice$, ou $force\ de\ traction$, qui est une force exercée par un autre objet (le plus souvent une corde) ou par un moteur (mécanique ou, pourquoi pas, un corps humain), qui tracte ou pousse l'objet et dont la direction et le sens dépendent de l'objet ou du moteur en question.

Bien entendu, cette panoplie n'est pas exhaustive *en physique* : elle fonctionne néanmoins comme telle dans la séquence étudiée de cette classe. Examinons à présent comment les élèves s'approprient ces règles, cette procédure et cette panoplie, toutes plus ou moins implicites, et si leurs pratiques procède par imitation des usages de l'enseignant.

6.8.3.2 Schématisations d'élèves : leurs cheminements

Pour reconstruire le point de vue des élèves, de nombreux exemples sont disponibles dans les traces récoltées pour la recherche. J'ai choisi quatre dessins que les élèves ont effectués à l'occasion de diverses tâches scolaires. Je ne présenterai ni les consignes ni les réponses verbales des élèves à ces tâches, car je m'intéresse ici uniquement à la pratique du dessin des forces par les élèves.

Les cheminements reconstruits sont ainsi limités aux tracés des dessins, et aux quelques traces discursives servant à nommer les forces. Les réponses des élèves aux tâches scolaires ne sont pas incluses, car leur présentation nécessiterait de discuter les consignes, ce qui n'est pas le but ici. En outre, ces réponses ne portent de toute manière pas sur le dessin des forces. Lors de la reconstruction des cheminements des élèves, je discute ici exclusivement de la manière dont les élèves pratiquent ces dessins et s'ils imitent le langage illustratif utilisé par l'enseignant, p.ex. celui du polycopié.

Premier cheminement : *une imitation stricte de la schématisation de l'enseignant*

La figure 6.51 (p. 644) fournit un exemple de dessin des forces qu'une élève (Sylvie) utilise pour déterminer le travail de chaque force exercée sur un corps glissant sur une pente.

L'exercice complété par Sylvie est reproduit dans son intégralité à la figure 6.52 (p. 645). Que peut-on dire de la manière qu'a Sylvie d'esquisser son dessin des forces ?

En examinant le dessin des forces de Sylvie, on peut faire une première remarque concernant l'objet sur lequel s'exercent les forces : quand bien même la consigne désigne explicitement "une skieuse", l'élève

567. D'où le nom de *force normale* ($\overrightarrow{N}$) qui lui est parfois donné.

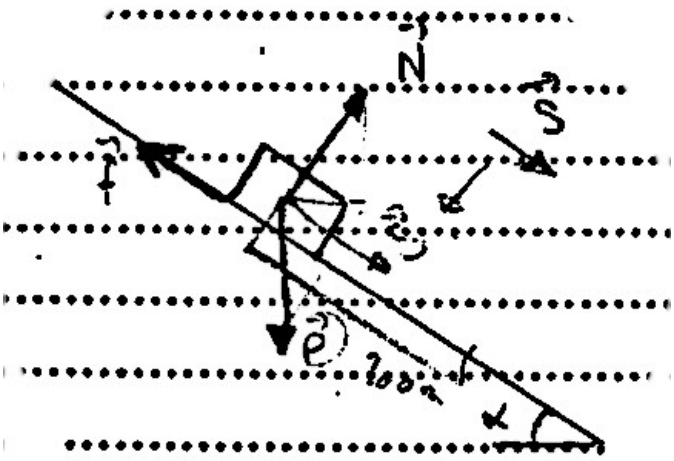


FIGURE 6.51 – Agrandissement du dessin des forces de Sylvie, voir figure 6.52, p. 645.

esquisse un chariot sans roue, espèce de container rectangulaire tel qu'on le trouve sur le polycopié (voir figure 6.47, p. 638). La force de frottement $\overrightarrow{f}$ est également placée comme dans cette illustration du polycopié : elle prend son origine au point de contact entre le rectangle et le sol en pente, à l'arrière du rectangle. C'est en effet la seule illustration disponible aux élèves d'un dessin des forces qui présente la force de frottement. Les autres forces, force de gravitation (ou poids, $\overrightarrow{P}$) et force de soutien (ou normale, $\overrightarrow{N}$), sont placées avec leur origine du centre de gravité de l'objet, le centre géométrique du rectangle. On retrouve justement ce placement dans les schématisation de l'enseignant qui font intervenir ces forces, par exemple sur l'autre illustration du polycopié (voir figure 6.48, p. 639), ou encore sur les esquisses au tableau noir (voir figures 6.49, p. 640, et 6.50, p. 641). Si ces détails du placement variable des flèches dénotant les vecteurs force n'a guère d'importance au niveau mathématique, du fait que les vecteurs n'ont pas de position dans l'espace, au niveau psychologique ils sont révélateurs de l'imitation à laquelle Sylvie procède pour effectuer son dessin des forces.

En plus d'esquisser des flèches désignant trois forces différentes, Sylvie esquisse également deux flèches pour $\overrightarrow{s}$, la distance, elle aussi représentée comme un vecteur. Le dessin permet de constater l'hésitation de Sylvie quant au placement de cette flèche dénotant le vecteur distance, car on le retrouve à deux endroits et un trait inachevé semble avoir servi de tentative infructueuse de placer cette flèche. Sylvie a clairement indiqué $\overrightarrow{s}$ une première fois en partant du centre de gravité de l'objet, comme les flèches dénotant les forces de gravitation et normale, et une seconde fois quelque part au-dessus de l'objet, dans une position flottante. Cette position rappelle la première illustration du polycopié (voir figure 6.47, p. 638) où la "vitesse de déplacement" est placée de la même manière. Là aussi, Sylvie semble imiter les pratiques de l'enseignant. Procède-t-elle ainsi pour marquer la différence entre des flèches désignant des forces et celle qui désigne une distance ? Le dessin qu'elle effectue ne nous fournit pas d'indice pour discuter cette question.

Ce dessin des forces permet également à Sylvie de poser un angle, l'angle α, et d'utiliser la trigonométrie déterminer la valeur du travail effectué par chacune des forces dans le sens et la direction du déplacement

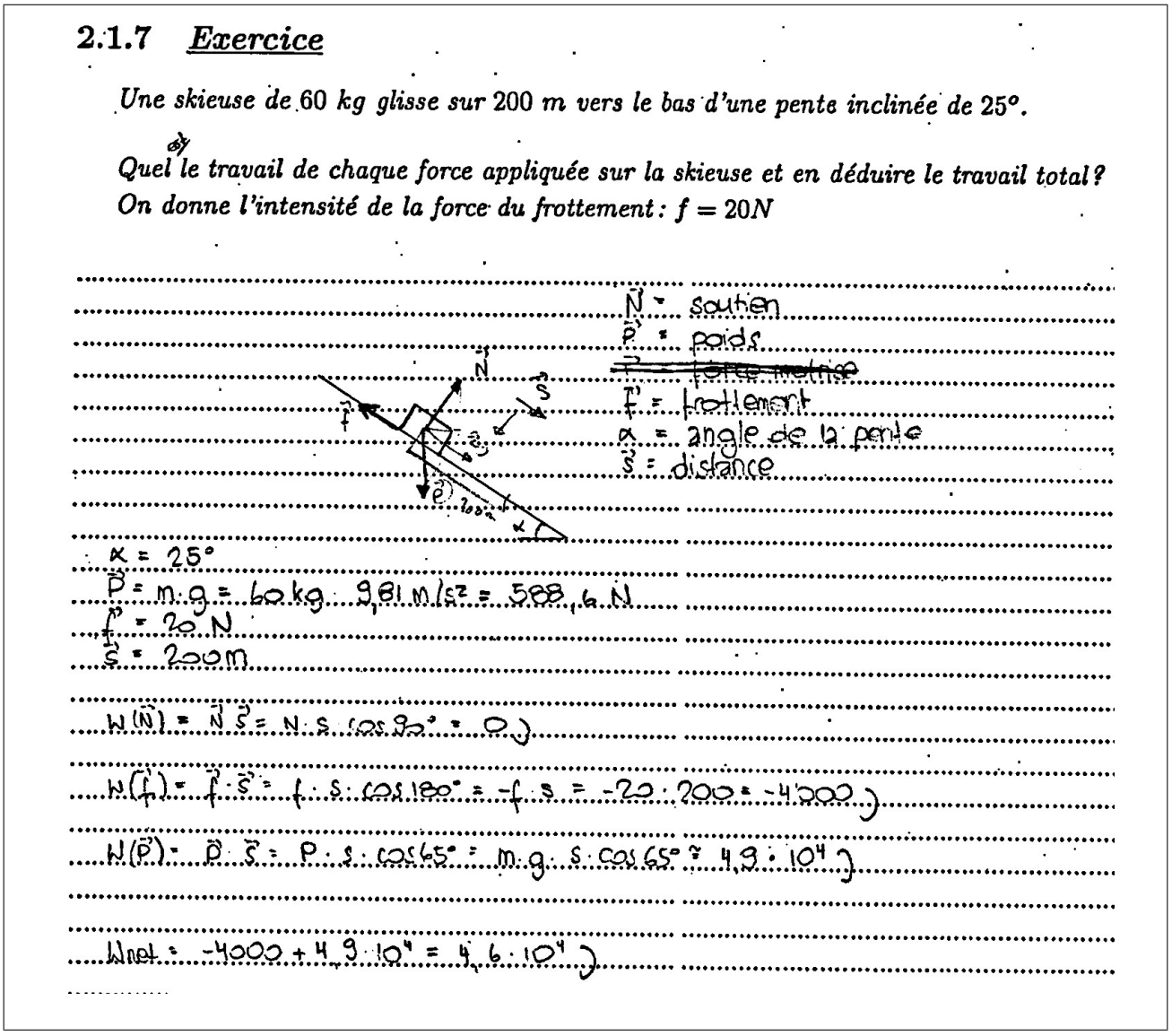


FIGURE 6.52 – Le dessin des forces mettant en oeuvre le calcul trigonométrique dans un exercice écrit d'élève.

de la skieuse (voir figure 6.52). Moyennant l'esquisse d'autres triangles, cet angle permettrait également d'utiliser la trigonométrie pour déterminer la somme des forces exercées sur la skieuse, mais ce n'est pas la question posée dans la consigne.

Deuxième cheminement : *une double représentation des forces*

Dans le dessin reproduit ci-dessous par la figure 6.53 (p. 646), Annette propose une double représentation des forces.

Nous y voyons :

— sur la gauche, des flèches tracées directement sur le personnage illustré de la consigne de l'item #3 du pré-questionnaire : la "force de gravité" ("f") est représentée par une flèche avec la pointe à la

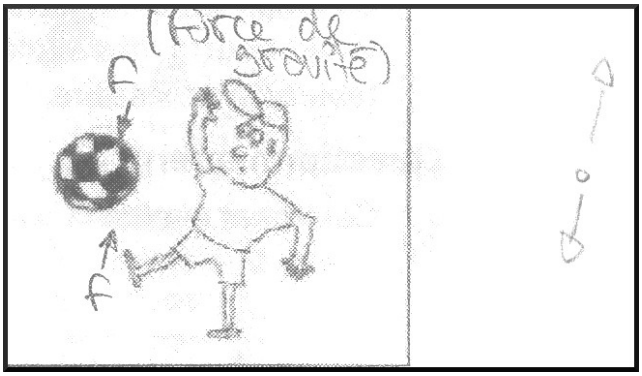


FIGURE 6.53 – Le dessin des forces de Annette, item #3 du pré-questionnaire.

surface du ballon de foot, et une autre force sans libellé (nommée "f") est représentée par une flèche dans une direction inclinée et identique, mais de sens opposé ;

— sur la droite, des flèches tracées dans la même direction inclinée que sur la partie gauche, l'une en sens opposé à l'autre, mais cette fois les pointes ne sont plus orientées vers l'objet (le ballon de football) mais vers l'extérieur de l'objet, qui n'est lui-même représenté plus que par un point.

Le fait d'offrir un double dessin des forces est intéressant à observer, car cela suggère que l'élève ait pensé à la spécificité du langage illustratif utilisé : dans la partie gauche, l'image fournie par la consigne de l'item #3 du pré-questionnaire fait usage d'un langage visuel figuratif, inspiré des bandes-dessinées, alors que dans la partie de droite Annette fait usage d'un langage visuel technique, qui semble plutôt s'inspirer d'un dessin des forces comme ceux que l'enseignant a esquissés au tableau noir (voir figures 6.49, p. 640, et 6.50, p. 641), qui fait usage d'un langage visuel propre aux mathématiques, où l'objet est par exemple réduit à un point mathématique situé en son centre de gravité.

Cette distinction entre langages visuels différents permet-elle d'expliquer pourquoi Annette trace les flèches à l'envers dans la partie de gauche ? En tout cas, cette pratique n'est pas anecdotique : douze élèves (12/22) ont dessiné des flèches inversées à cet item du post-questionnaire. Le cheminement de ces élèves procède peut-être du langage visuel de la bande-dessinée, en utilisant l'objet visuel flèche comme un signe désignant le mouvement qui consiste à appuyer sur la balle : il est alors assez naturel de tracer la pointe de la flèche désignant la force de gravité à la surface extérieure du ballon et dans la direction (inclinée) de sa trajectoire, comme si la gravité lui appuyait dessus par en haut. Cette hypothèse pourrait aussi rendre compte de la position pour le moins étrange de l'autre force, "f", assez exactement à mi-chemin entre le pied et le ballon...

Une autre hypothèse quant à ce cheminement ferait procéder l'élève à partir du langage vernaculaire utilisé : Annette aurait tracé les flèches sur la partie gauche en partant du prédicat $\pm exercer\ sur$ (•), en faisant des flèches non plus des signifiant dénotant des vecteurs, mais des signifiants dénotant ce sur quoi $s'exerce$ la force en question, autrement dit spécifiant la place libre (•) du prédicat $\pm exercer\ sur$.

Dans tous les cas, la réticence de cette élève à poser des flèches dénotant des vecteurs sur une illustration de type bande-dessinée semble plutôt liée à un soucis de cohérence qu'à un manque de compétence ou à des difficultés de compréhension, puisqu'elle parvient à fournir sur la partie de droite, en parallèle, un dessin des forces respectant les normes illustratives utilisées par l'enseignant au tableau noir. À la représentation figurative de flèches désignant des pressions exercées sur la balle, elle fait correspondre à côté, dans *un autre monde*[568], une représentation d'objets mathématiques[569] : un point représentant le point mathématique du centre de gravité de la balle, et des flèches dénotant des vecteurs partant de ce point. En conséquence, d'une représentation à l'autre le sens des flèches s'inverse. Cette manière de procéder peut effectivement paraître plus rigoureuse, au niveau sémiotique, que de superposer les deux langages visuels.

Troisième cheminement : *des vecteurs hétérogènes sur un même dessin*

Dans le dessin reproduit ci-dessous par la figure 6.54 (p. 647), le dessin des forces d'un groupe d'élèves mélange des flèches désignant des forces à d'autres, désignant une vitesse ("$\overrightarrow{v}$") et une accélération ("$\overrightarrow{a}$").

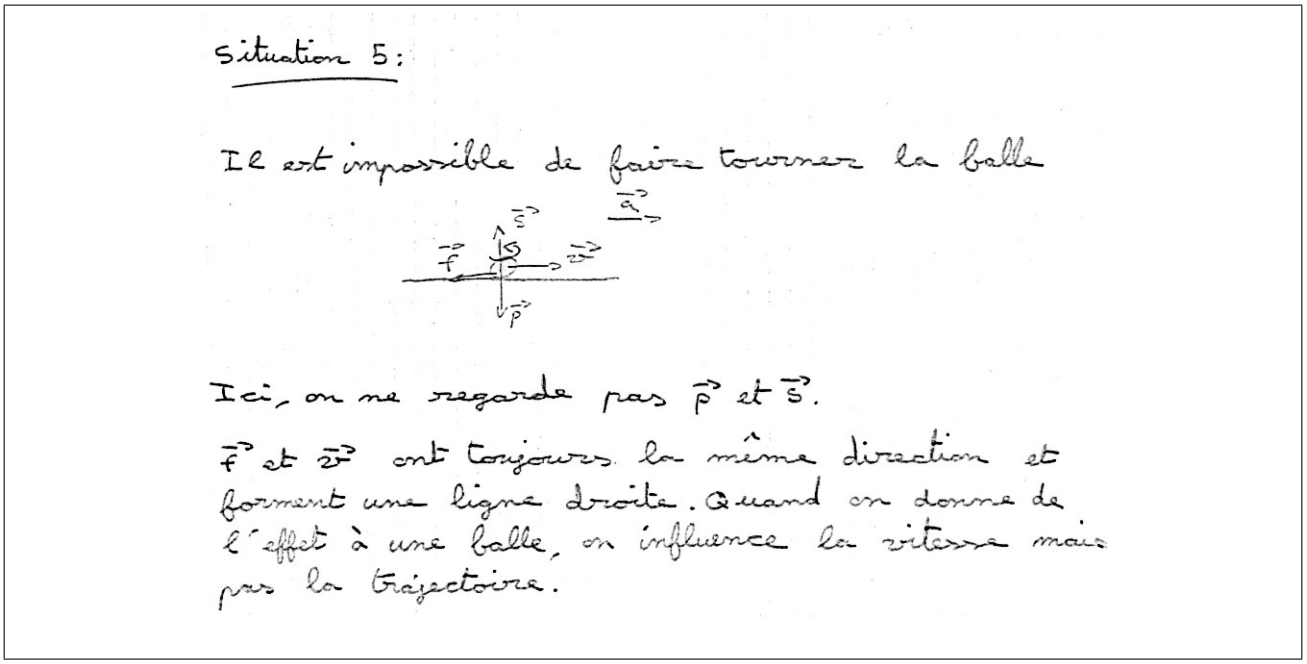


FIGURE 6.54 – Le dessin des forces du groupe Germaine, Ilona et Urs dans le rapport expérimental de la situation-problème #5.

Comment ces élèves parviennent-ils à gérer l'hétérogénéité des vecteurs dénotés par les flèches qu'ils tracent ? Ils semblent s'inspirer des schématisations de l'enseignant : les flèches désignant des forces sont placées à partir du centre de gravité de la balle, sauf la force de frottement qui prend son origine en bas de l'objet sur le côté arrière comme dans l'illustration du polycopié de la figure 6.47 (voir p. 638), alors que la flèche désignant une accélération ($\overrightarrow{a}$) est placée au-dessus du dessin, dans une position flottante comme l'enseignant place la flèche désignant "la vitesse de déplacement" dans l'illustration du polycopié

568. Ceci est un clin d'oeil à la métaphysique de Popper.
569. Au sens d'objet discursifs utilisant le langage mathématique.

citée ci-dessus. Une petite différence apparaît néanmoins entre la pratique de ces élèves et l'illustration du polycopié, puisque la vitesse ($\overrightarrow{v}$) est représentée sur le dessin de ces élèves comme les forces, avec une flèche prenant pour origine le centre de la balle.

Globalement, cet exemple fournit également un indice de l'appropriation d'une pratique par imitation, même si cette imitation est moins stricte que celle de Sylvie présentée pour le premier cheminement.

Quatrième cheminement : *illustration conforme des forces pour une physique non conforme*

Les deux dessins des forces reproduits ci-dessous par la figure 6.55 ont été effectués par le même élève, Alain, lors des pré-questionnaire et post-questionnaire. Le premier dessin (à gauche) représente un ballon de foot au moment où il a quitté le pied du personnage, dans un mouvement vers le haut. Le deuxième dessin (à droite) représente un bouchon de bouteille de mousseux à trois moments successifs de sa trajectoire balistique.

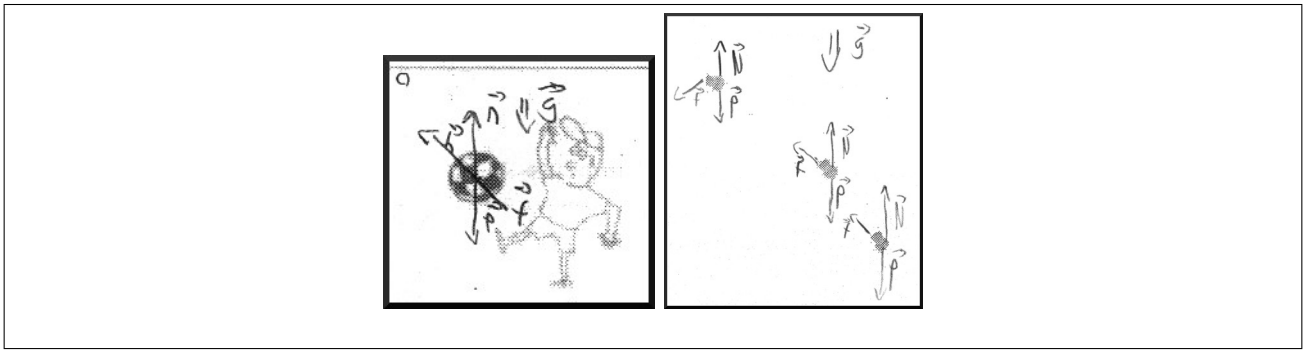


FIGURE 6.55 – Le dessin des forces de Alain, à l'item #3 au pré-questionnaire (encadré de gauche) et à l'item #9 au post-questionnaire (encadré de droite).

Alain a dessiné des flèches en plaçant leur origine au centre de gravité de l'objet, qui désignent le poids ("$\overrightarrow{p}$"), le soutien ou *force normale* ("$\overrightarrow{n}$" ou "$\overrightarrow{N}$"), le frottement ("$\overrightarrow{f}$") et une force du ballon ("$\overrightarrow{b}$") dans la direction et le sens du mouvement du ballon de football. Malgré les forces non conformes au modèle enseigné ($\overrightarrow{b}$ pour le dessin de gauche, et $\overrightarrow{N}$ sur le dessin de droite), ces flèches respectent les normes illustratives des dessins des forces utilisés par l'enseignant.

À ces flèches partant du centre de l'objet s'ajoute, sur les deux dessins, une double flèche flottante désignant la force de gravité. Nous avons déjà vu cette position flottante, utilisée dans les schématisations de l'enseignant pour la vitesse ou le poids. Dessine-t-il la flèche désignant la force de gravitation ainsi pour signaler qu'elle est une force invisible s'appliquant à tout, dans une interprétation spatiale de cette posture flottante en terme de force omniprésente, ou quelque chose dans ce genre ? Ce n'est pas impossible que la norme illustrative ait pris chez Alain un sens plus conceptuel que prévu, faisant écho au fait que la force de gravitation s'exerce *à distance*. Le problème dans les dessins reproduits ci-dessus effectués par Alain, c'est qu'il représente cette force deux fois : il a dessiné une flèche désignant le poids ($\overrightarrow{P}$) et ajoute encore celle désignant la gravité ($\overrightarrow{g}$).

À voir cette pratique du dessin des forces dans son ensemble, tout porte à croire que l'élève imite une pratique de dessin - jusqu'au détail des flèches surlignant les lettres désignant les forces - mais sans comprendre. Alain a également dessiné une flèche désignant une force "du ballon" ("$\overrightarrow{b}$"), alors que celle-ci n'existe pas du tout dans la panoplie de l'enseignant. Il respecte néanmoins les conventions graphiques du dessin des forces, jusqu'à choisir la première lettre de "ballon" pour dénommer la force "$\overrightarrow{b}$", dûment surmonté de la flèche $\overrightarrow{\ }$ indiquant qu'il s'agit d'un vecteur.

La représentation d'une force dans le sens du mouvement du ballon est fréquente dans les réponses des élèves à l'item #3 du pré-questionnaire : sept élèves (7/23) ont dessinée une flèche de ce type. Le dessin de Cassandra, reproduit ci-dessous dans la figure 6.56 (p. 649) avec l'intégralité de la consigne et de sa réponse à l'item #3, permet de glaner quelques indices supplémentaires sur cette pratique.

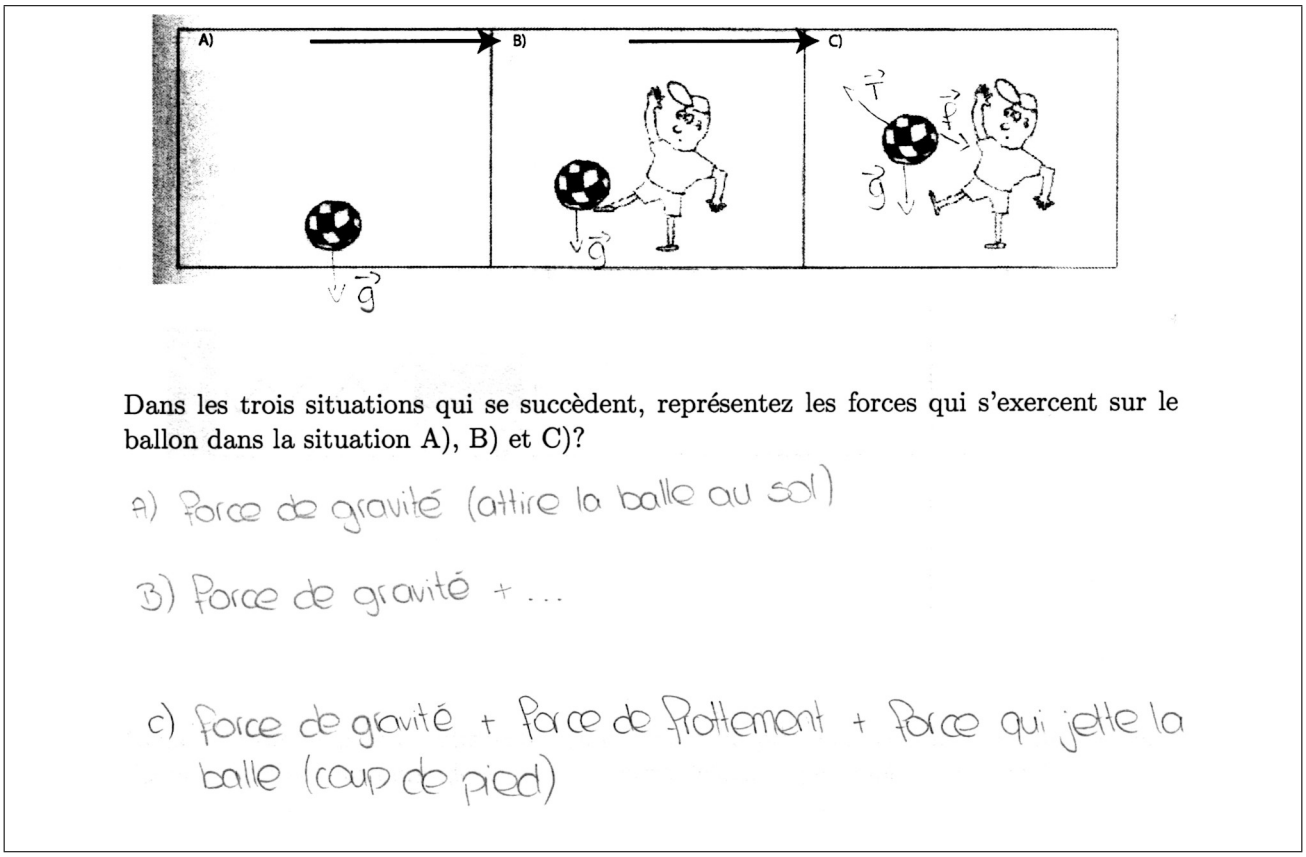


FIGURE 6.56 – Le dessin des forces de Cassandra, situation-problème #3 du pré-questionnaire.

Cassandra nomme cette flèche qui va dans la direction et le sens du mouvement de la balle $\overrightarrow{T}$ sur son dessin, et "force qui jette la balle (coup de pied)" dans son discours en commentaire. L'étiquetage n'est pas toujours aussi explicite chez Cassandra. La précision amenée par Cassandra dans son discours verbal évoque la *force de vitesse* ou *force d'inertie*, que Newton a longtemps hésité à considérer *existante* avant de se raviser face aux résultats de ses expérimentations (Koyré, 1968). J'y reviendrai dans les analyses des échanges entre l'enseignant et les élèves, car cette force est centrale à l'hypothèse d'une situation de malentendu dans le dessin des forces.

Ces exemples du dessin des forces montrent que les élèves peuvent tout à la fois respecter les normes illustratives et se tromper quant au choix des forces à prendre en considération, voir comme Alain représenter la même force deux fois sans se rendre compte de la synonymie entre $\overrightarrow{P}$ et $\overrightarrow{g}$.

Parmi la diversité de ces pratiques du dessin des forces, y a-t-il des situations de malentendu ?

6.8.4 Enquête quant à une situation de malentendu

6.8.4.1 Introduction

Conformément à notre définition des situations de malentendu (voir p 222), je considérerai qu'il y a situation de malentendu si les deux conditions suivantes sont remplies :

1. La schématisation analysée permet d'identifier une divergence entre le point de vue de l'enseignant et celui d'au moins un-e élève quant à la pratique du dessin des forces.
2. La description de la divergence dans la schématisation de l'élève permet de montrer que sa schématisation procède d'une schématisation antérieure de l'enseignant, c'est-à-dire que la schématisation de l'élève constitue une interprétation de l'enseignement dispensé, quoique divergente sur un point précis.

Le premier critère semble satisfait, puisque les cheminements présentés permettent de relever en quoi les pratiques du dessin des forces varie d'une esquisse à l'autre. Le problème, cependant, c'est que nous avons observé ces variations autant chez l'enseignant que chez les élèves. La question qui se pose dès lors est la suivante : les variations entre les esquisses des élèves et celles de l'enseignant sont-elles qualitativement différentes de celles que l'on peut observer entre des esquisses produites ou utilisées uniquement par l'enseignant ? Si ce n'est pas le cas, je ne pourrai pas considérer qu'elles constituent une situation de malentendu, les variations observées chez les élèves pouvant tout à fait être *conformes* à celles observées chez l'enseignant, soit qu'elles sont considérées *normales* dans le contexte, soit qu'elles dépendent d'autres facteurs (le type de problème, la consigne, etc.).

Le second critère est rempli en ce qui concerne les quatre cheminements présentés à la section précédente : l'analyse montre que les élèves pratiquent le dessin des forces en imitant les illustrations de l'enseignant, parfois jusqu'au moindre détail et de manière différenciée quand l'enseignant a justement fourni des dessins des forces divergent entre eux. Même lorsque les forces représentées ne sont pas conformes aux réponses escomptées dans les tâches examinées, les dessins des élèves prennent appui sur les exemples d'illustrations et esquisses au tableau noir effectuées par l'enseignant (voir section 6.8.3.1, p. 638).

Pour répondre à la question soulevée ci-dessus, je pourrais procéder à une analyse de la pratique du dessin des forces qui compare systématiquement les variations relevées entre les esquisses des élèves et

celles entre les esquisses de l'enseignant. Cependant, une analyse portant uniquement sur les esquisses ne permet pas de reconstruire le *sens* que prennent ces variations dans le contexte de cette classe *selon les points de vue* des élèves et de l'enseignant, en particulier parce que les élèves procèdent souvent par imitation visuelle des esquisses de l'enseignant. Reconstruire le sens des dessins des forces du point de vue de l'enseignant était facilitée par les multiples sources disponibles quant aux savoirs à enseigner. Je ne peux néanmoins pas attribuer aux élèves les habitudes d'enseignement et les savoirs de physique scolaire habituels de cet établissement scolaire comme je l'ai fait pour l'enseignant, puisqu'ils sont justement en apprentissage.

Pour reconstruire le sens du dessin des forces du point de vue de l'enseignant, par contre, j'ai pu poser quelques hypothèses sur le sens que prend la pratique du dessin des forces à partir d'indices liés aux savoirs enseignés, aux discours produit sur le polycopié, etc. À partir de ces indices, j'ai reconstruit quelques règles d'action du dessin des forces, et montré qu'il est aussi une procédure du point de vue de l'enseignant (voir la liste p. 642). Cette procédure permet notamment de choisir les forces en présence, et de décider lesquelles vont avoir un effet sur le phénomène étudié, et elle se base sur une *panoplie* de forces acceptées en physique. L'ensemble (règles d'action, procédure et panoplie des forces existantes) fonctionne du point de vue de l'enseignant comme une ressource dans la résolution de problèmes nécessitant une somme des forces ou, au moins, de connaître l'angle entre au moins deux forces exercées sur le même objet.

Pour examiner si le *sens* que les élèves donnent au *dessin* des forces diverge effectivement de celui de l'enseignant, je ne vais donc pas comparer plus systématique les esquisses produites et leurs variations, mais plutôt analyser les rares traces discursives qui abordent la question du dessin des forces. Je ne traiterai cependant ces traces que relativement aux règles d'action, à la procédure et à la panoplie des forces que mobilise la pratique du dessin des forces, sans entrer dans une analyse d'éventuelles divergences relatives aux savoirs enseignés. En effet, pour cela il faudrait d'abord présenter dans le détail les tâches concernées, comme nous l'avons fait dans les autres situations de malentendu.

Les questions posées pour l'analyse sont les suivantes :

1. Y a-t-il des règles d'action qui émergent des pratiques des élèves, et sont-elles semblables à celles de l'enseignant ?

2. Le dessin des forces est-il une procédure pour les élèves, et si oui est-il semblable à celle mise en évidence pour reconstruire le point de vue de l'enseignant ?

3. Existe-t-il une panoplie des forces existantes pour les élèves, parmi laquelle ils vont choisir celles qui sont pertinentes pour leur dessin, et est-ce la même que celle qu'utilise l'enseignant ?

L'analyse des traces présentées ci-dessous reprend uniquement les trois questions énoncées ci-dessus pour examiner à chaque fois l'hypothèse d'une situation de malentendu dans le dessins des forces, portant respectivement sur (1) les règles d'action de la pratique du dessin des forces, (2) la procédure de résolution de problème et (3) la panoplie des forces.

6.8.4.2 Première hypothèse (règles d'action) : *des flèches dans tous les sens*

Parmi les règles d'action, la reconstruction des cheminements des élèves met surtout en évidence des divergences quant à la position des flèches, et à leur direction relativement à l'objet. Parfois (voir le cheminement #2, *une double représentation des forces*), deux versions divergentes sont produites par le même élève. La reconstruction de quatre cheminements d'élève sélectionnés parmi les plus divergents nous permet de spécifier en quoi consistent ces divergences entre les dessins des forces observés :

- le positionnement des flèches désignant des forces varie d'une esquisse à l'autre, parfois même pour un même élève sur la même tâche, de deux manières :
  - au niveau du point d'origine partant tantôt de la surface de l'objet et tantôt de son centre ;
  - au niveau du placement relativement à l'objet esquissé, certaines flèches étant placées loin de l'objet dans une position flottante, le plus souvent lorsqu'elles désignent autre chose qu'une force (distance, vitesse ou accélération) mais aussi parfois pour la force de gravitation ;
- le sens des flèches désignant des forces varie d'une esquisse à l'autre, tantôt avec la pointe de flèche orientée sur l'objet tantôt à l'inverse, et là aussi parfois même sur un seul dessin ;
- le nombre de fois qu'une flèche est représentée sur le dessin des forces varie également, qu'elle désigne une même force (voir figure 6.55, p. 648) ou autre chose (voir figure 6.51, p. 644).

Force est de constater que ces divergences se retrouvent toutes aussi dans les dessins des forces utilisés par l'enseignant. Même la flèche inversée, avec la pointe dirigée vers l'objet sur lequel s'exerce la force, est représentée dans une des illustrations du polycopié (voir figure 6.45, p. 636).

Examinons à présent les traces des échanges entre les élèves et l'enseignant portant sur le dessin des forces. Un seul extrait du corpus soulève explicitement la question des règles d'action du dessin des forces. À la phase 2 de la séquence, alors que Alain, Etienne et Pierrette travaillent en groupe à l'exercice 4A, Pierrette est tentée de représenter la vitesse de la bille dans son dessin des forces, et appelle l'enseignant pour lui demander comment faire avant de dessiner une flèche dans le sens du mouvement de la bille. Dans l'échange qui s'ensuit, Pierrette semble rencontrer une difficulté quant aux règles d'action du dessin, puisqu'elle demande explicitement "comment on représente la vitesse ?" :

Enregistrement de Alain Etienne et Pierrette -Exercice 4A avec le microworld

```
Pierrette:  comment on représente la vitesse (.) en fait la vitesse c'est
            c'est c'est f (.)
Enseignant: la vitesse ?
Pierrette:  ou c'est pas la même chose ?
Enseignant: non
Pierrette:  alors je l'a met encore à côté
Enseignant: vous avez ce F là
((l'enseignant désigne sur la feuille d'exercice une flèche dessinée par les
élèves dans la direction et le sens du mouvement de la bille en bas la pente))
Enseignant:  (.) juste savoir (.) au fond (.) c'est quoi ?
```

```
Pierrette:  je sais pas
Enseignant: c'est quoi (.) pour vous (.) f
Pierrette:  la force motrice (.) mais elle a pas de moteur ((rire)) mais on est
            bien obligé de compenser le frottement (.) ah non si on le néglige
            (.) ah ouais okay
Enseignant: même si on ne néglige pas le frottement
Pierrette:  mais si on ne néglige pas le frottement elle va en arrière ?
Enseignant: si on ne néglige pas le frottement ici
Pierrette:  ouais
Enseignant: il y a encore la pente
Pierrette:  ah donc ça ce serait la pente alors
Enseignant: c'est la pente qui joue (.) qui joue (.) si vous voulez le rôle de
            la force motrice
Pierrette:  mm
Enseignant: mais c'est vrai quand vous laissez (.) il y a pas de force ici (.)
            il y a pas de moteur (.) c'est vrai quand je laisse comme ça la
            bille elle va pas bouger toute seule
Pierrette:  non non
Enseignant: elle va
Pierrette:  ouais ouais (.) donc heu je fais comment pour mettre sur le dessin ?
Enseignant: alors vous enlever tout simplement ça (.)
Pierrette:  ouais
Enseignant: la force motrice n'existe tout simplement pas
Pierrette:  mm (.) et puis la vitesse je la représente comment?  je fais un
            autre un peu comme un la (X)
Enseignant: non ce qui est demandé c'est (.) c'est vraiment les (.) les forces
Pierrette:  aha
Enseignant: il n'y a pas de vitesse sur le dessin
Pierrette:  alors je la mets pas
Enseignant: que les forces
```

12.12.2006 b 27'44" à 28'57"

L'enseignant affirme clairement exclure toute représentation de la vitesse dans un dessin des forces, dans l'extrait cité ci-dessus : "il n'y a pas de vitesse sur le dessin" (transcription p. 653, ligne 40). Pourtant, le support de cours mélange la représentation de forces avec celle d'une vitesse dans l'illustration de la loi de l'inertie du cours théorique (voir figure 6.47, 638). Vu cette occurrence antérieure dans le processus de communication, Pierrette reprend peut-être son objectif de représentation de la vitesse sur le dessin des forces de la pratique de l'enseignant.

Au vu de cette brève analyse, l'hypothèse d'une situation de malentendu quant aux règles d'actions du dessin des forces me semble défendable pour cet échange entre Pierrette et l'enseignant. Elle porterait sur la possibilité d'inclure la représentation de vitesses dans un dessin des forces. Dans l'échange ci-dessus, l'enseignant demande à l'élève de ne pas dessiner les vitesses, en particulier parce que la consigne de l'exercice 4A est explicite sur ce point, mais le polycopié comprend un exemple où vitesse et forces sont représentées sur la même esquisse. Pour être précis, l'extrait ci-dessus constituerait le moment de la

résolution de la situation de malentendu, puisque l'intervention de l'enseignant ("il n'y a pas de vitesse sur le dessin", voir transcription p. 653, ligne 40) satisfait l'intention illocutoire [570].

Pour le reste des traces à disposition, je ne retiens pas cette hypothèse d'une situation de malentendu quant aux règles d'action du dessin des forces, car les variations observées chez les élèves sont qualitativement semblables aux variations entre les illustrations du polycopié et les esquisses de l'enseignant au tableau noir, et l'unique échange à ce sujet reproduit ci-dessus porte, en fait, sur une difficulté d'un autre type, en l'occurence la question de savoir s'il est permis de représenter une vitesse sur un dessin des forces.

Il y a néanmoins davantage à comprendre de cet échange, et d'autres hypothèses peuvent être énoncées. En effet, si Pierrette énonce sa difficulté sous la forme d'une question ciblant les conventions du dessin des forces, en l'occurrence sur la manière d'y inclure la vitesse, le questionnement prudent de l'enseignant lui permet d'identifier une difficulté portant sur le choix des forces (problème de procédure), voire sur l'existence d'une *force de vitesse* ou d'une *force d'inertie* (voir par exemple la "force qui jette la balle" sur la figure 6.56, p. 649), c'est-à-dire à un problème de panoplie.

6.8.4.3 Deuxième hypothèse (procédure) : *dessiner* versus *dessiner ou pas*

L'analyse d'un autre échange portant explicitement sur le dessin des forces peut contribuer à comprendre le problème que rencontre Pierrette. Ce second échange apparaît à la phase 2 de la séquence : les élèves travaillent en groupe à une série d'exercice avec l'aide du logiciel *Marble Moves*. Le groupe composé de Daniel, Nina et Yves travaille à l'activité 4 (voir figure B.13, p. 815), quand Daniel appelle l'enseignant et engage un dialogue sur ce qu'il faut dessiner à l'exercice 4A, phase 1.

La consigne de cet exercice est reproduite à la figure 6.57 (p. 655).

La question de Daniel porte spécifiquement sur le nom d'une force qu'il a représenté sur son dessin, la "force qui pousse la bille". L'enseignant, par contre, lui renvoie une autre question, suscitant le *choix* de cette "force qui pousse la bille".

Voici la transcription de cet échange :

Enregistrement de Daniel Nina et Yves -Exercice 4A avec le microworld

```
1 Daniel:     monsieur? (.) on va pas l'appeler force motrice (.) on va l'appeler
2             comment?
3 Enseignant: quelle force?
```

570. Voir par exemple Trognon et Larrue (1988b) pour le rôle de validation du troisième tour de parole dans un échange dialogué. J'ai considéré, par hypothèse et pour l'enquête, que la première intervention de cet échange est constitué du cours théorique écrit que Pierrette aurait lu et imité, c'est-à-dire la représentation graphique de la vitesse par une flèche dans une position flottante, la deuxième intervention (la réponse) la proposition de Pierrette de dessiner une force dans la direction et le sens du mouvement de la bille, et la troisième intervention (la confirmation) la non-validation par l'enseignant qui *satisfait* néanmoins l'intention illocutoire, mais sans la faire *réussir*, puisque l'interprétation de Pierrette est infirmée par l'enseignant. Auparavant, l'enseignant ne répond pas à la question de Pierrette mais, probablement en faisant l'hypothèse qu'elle confond *vitesse* et *force*, ou qu'elle souhaite dessiner une *force de vitesse* et tente plutôt de lui faire réfléchir à la présence ou non d'une *force motrice*.

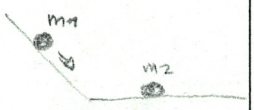
Tableau 4 *avec force de frottement*	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 3**
1B : **Dessin de la position des billes (rappel)**			
4A : **Vecteurs représentant les forces exercées sur la bille n°1, elle-même représentée par un point**			

FIGURE 6.57 – Extrait de la feuille d'exercice de Daniel *avant* la réponse à l'exercice 4A, activité 4 Marble Moves.

```
Daniel:     la force qui pousse la bille
Enseignant: est-ce qu'il y a encore une force qui pousse la bille? pourquoi (.)
            qu'est-ce qui pousse la bille ici?
Daniel:     parce qu'elle est en pente
Enseignant: quand on a la force motrice c'est quand?
Daniel:     quand il y a un moteur
Enseignant: et là il n'y a pas de moteur
Daniel:     ouais mais alors pourquoi (.) on l'appelle comment cette force?
Enseignant: il n'y a pas de force
Daniel:     ah il n'y a pas de force (.) okay
Enseignant: la pente (.) c'est à cause de la pente
Yves:       donc en fait il n'y a qu'une force de frottement?
Enseignant: oui
Daniel:     donc c'est ça qu'on doit refaire (.) on doit faire ça ça veut dire
Enseignant: il y a encore d'autres forces
Daniel:     la force comme ça ((vers le bas)) et comme ça? ((vers le haut))
Enseignant: mm (.) la force
Daniel:     g ?
Enseignant: de soutien
Daniel:     donc ça ((désigne la flèche vers le bas)) (.) on l'appelle G (.) force
            de gravité?
Enseignant: on l'appelle P (.) le poids
Daniel:     c'est un P majuscule?
Enseignant : regardez (.)
((l'enseignant dessine dans la marge de la feuille d'exercice de Daniel))
            si on a (.) donc le poids (.) ici ((pointe la flèche vers le haut))
            c'est (.) et puis N (.) qu'on appelle la force de soutien (.) mais
            la force normale (.) vous voyez ça?
Daniel:     mm
Enseignant: et vous avez une pente (.) vous avez une pente (.) là ici (..)
            vous avez bien sûr (.) s'il y a les frottements vous avez les
            frottements
Daniel:     mm
```

```
37 Enseignant: et vous avez P (.) le poids
38 Daniel:     où ça? là?
39 Enseignant: et puis la force normale (.) la force de soutien
40 Daniel:     okay (.) merci
41
```

12.12.2006 bb 14'04"-15'42'

Daniel demande l'aide de l'enseignant pour une opération α - il s'agit de trouver le nom de la "force qui pousse la bille" - alors que l'enseignant opère à partir de la schématisation de l'élève pour tenter de lui faire construire une opération δ - une décision concernant la présence ou non d'une force motrice. Il s'agit bien ici d'une divergence entre la schématisation de Daniel et celle de l'enseignant. Probablement l'enseignant a-t-il le sentiment que Daniel écrit sans comprendre, ce qui se manifeste discursivement par des questions sur la forme plutôt que le contenu ("c'est un P majuscule ?"). J'observe pour le moins que l'enseignant décide au milieu de l'échange (ligne 27) de dessiner, dans la marge de la feuille, la réponse adéquate. Cette esquisse de l'enseignant est reproduite à la figure 6.59 (p. 658).



FIGURE 6.58 – Esquisse de l'enseignant en marge de la feuille d'exercice de Daniel, activité 4 Marble Moves.

Il semblerait que nous ayons ici une situation de malentendu portant sur la procédure du dessin des forces : nous pouvons faire l'hypothèse que du point de vue de Daniel la tâche consiste à dessiner *toutes* les forces, alors que du point de vue de l'enseignant elle consiste à *dessiner ou ne pas dessiner* toutes les forces. Exprimé à l'aide de la logique naturelle, Daniel[571] interprète la procédure prévue par l'enseignant, à savoir $\pm dessiner\ toutes\ les\ forces\ de\ la\ panoplie$, comme une procédure plus simple qui consisterait à $+dessiner\ toutes\ les\ forces\ de\ la\ panoplie$. Effectivement, la langue vernaculaire ne permet pas facilement de faire ce genre de nuance : en utilisant dans une consigne orale "dessinez les forces", l'enseignant schématiserait en langue naturelle les deux variantes ($\pm dessiner\ les\ forces$ et $+dessiner\ les\ forces$) de manière indifférenciée.

Cette hypothèse permet-elle également de rendre compte d'une partie de l'échange entre PIerrette et l'enseignant présenté ci-dessus (voir transcription p. 653) ?

La schématisation de Pierrette présente une divergence avec celle de l'enseignant qui est similaire à celle de Daniel dans l'extrait précédent : elle dessine une flèche dans la direction et le sens du mouvement de la bille vers le bas de la pente. Pour Pierrette, le dessin des forces semble fonctionner comme la finalité de sa réflexion, et non comme le moyen lui permettant de réfléchir aux forces qu'il s'agit d'inclure ou non. Elle schématise une coordination moyen-but où le dessin des forces est la finalité plutôt que le moyen : "je fais comment pour mettre sur le dessin" (ligne 32). Je pourrais paraphraser cette idée avec

571. Cette situation de malentendu concerne d'autres élèves au cours de la séquence, mais je n'ai pas voulu en présenter l'enquête systématique ici pour rester bref.

l'expression suivante : "parce qu'il faut dessiner les forces, elles existent". Cette inversion dans l'organisation raisonnée est plutôt implicite à sa schématisation, mais apparaît à l'enquête par l'absence de discours de Pierrette au sujet de la prise de décision de ce qu'il faut dessiner ou ne pas dessiner : son discours semble se focaliser exclusivement sur *comment* dessiner, sauf à sa dernière intervention de l'échange (ligne 41). Cette focalisation sur le *comment* du dessin des forces et l'inversion consistant à faire du dessin des forces le but de la tâche, plutôt qu'un moyen pour réfléchir au problème posé, corrobore l'hypothèse d'une situation de malentendu quant à la procédure : sous l'apparence d'une question sur les règles d'action du dessin des force, se cacherait cette même divergence entre $\pm dessiner\ les\ forces$ et $+dessiner\ les\ forces$ entre l'enseignant et Pierrette dans leur échange, c'est-à-dire une divergence au niveau de la procédure.

Si les échanges de Pierrette et Daniel avec l'enseignant analysés ci-dessus nous permettent de poser des hypothèses quant à une situation de malentendu, ils ont justement lieu au moment de la résolution du malentendu : les divergences de sens entre élèves et enseignant se jouent effectivement dans le dessin des forces lui-même, juste avant l'intervention de l'enseignant, mais à ce titre je ne peux pas les exprimer par les opérations de la logique naturelle, puisque celles-ci sont logico-*discursives*. Or, la divergence analysée au niveau de la procédure du dessin des forces concerne l'acte de dessiner et non le discours. La situation de malentendu porte spécifiquement sur le dessin des forces : ce que Pierrette et Daniel n'ont probablement pas interprété *en physiciens*, c'est que la physicienne ou le physicien *choisit* ce qui est représenté par la flèche, c'est-à-dire que le dessin des forces est une activité de modélisation, un *moyen* pour schématiser et non la *finalité* d'une schématisation. Évidemment, lorsque l'enseignant requiert des élèves une production de type "dessin des forces" aux élèves, le contrat didactique du milieu scolaire induit naturellement les élèves a donné à cette production la fonction de *finalité* plutôt que celle d'un *moyen* voulue en physique.

6.8.4.4 Troisième hypothèse (panoplie) : *la* vis inertia *de Newton*

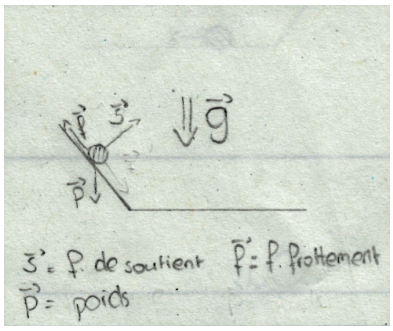
De l'analyse des échanges entre Daniel et Pierrette avec l'enseignant émerge une autre hypothèse quant aux divergences entre élève et enseignant dans l'interprétation du dessin des forces. Si la question de Pierrette porte sur la manière de représenter la vitesse dans un dessin des forces (règles d'action), et la question de Daniel sur le nom d'une force qu'il a représenté sur son dessin (procédure), dans les deux échanges la réponse de l'enseignant déplace le sujet de conversation vers la question de savoir quelle force "il y a". Cette schématisation peut s'entendre comme un choix des forces (une question de procédure), mais aussi comme une divergence quant aux forces qui "existent" en physique, c'est-à-dire sur ce que nous avons appelé la *panoplie* des forces acceptées en physique.

Examinons à présent cette hypothèse. Face aux difficultés que rencontre Daniel dans l'interprétation de son discours, l'enseignant esquisse dans la marge de la feuille d'exercice un dessin des forces (voir figure 6.59, p. 658) qu'il commente justement pour poser les forces existantes et aucune de plus. L'enseignant considère qu'il n'y a pas de "force qui pousse la bille" à la phase 1 de l'exercice 4A. Daniel avait sur son esquisse une force, la "force motrice", qu'il efface ensuite pour reproduire le dessin de l'enseignant au bon endroit (voir figure 6.59, p. 658).

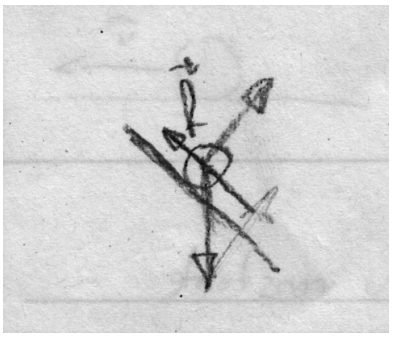


FIGURE 6.59 – Extrait des réponses de Daniel à l'exercice 4A, activité 4 Marble Moves.

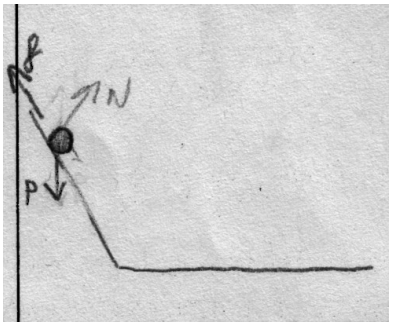
Daniel n'est pas le seul à rencontrer cette difficulté, par ailleurs décrite dans la littérature depuis longtemps (voir par exemple Viennot 1978). Sur d'autres esquisses effectuées par les élèves au même exercice 4A, nous pouvons observés à plusieurs reprises des flèches effacées allant dans le sens de la pente et du mouvement de la bille (voir figure 6.60, p. 658).



(a) Le dessin de Cassandra, Julianne, Laurie et Ferdinand.



(b) Le dessin de Ernest, Ophélie et Victor.



(c) Le dessin de Yves.

FIGURE 6.60 – Dessins des forces des élèves à l'exercice 4A avec une flèche effacée dans le sens du mouvement.

Ces flèches ne suffisent cependant pas à fournir un indice univoque d'une divergence quant à la panoplie des forces. En effet, les élèves ont peut-être voulu inclure dans leur dessin des forces une "force motrice" parce qu'elle fait partie de la panoplie présentée par l'enseignant au fil des diverses activités (voir l'extrait du polycopié[572] de la figure B.33, p. 854). Dans ce cas, il n'est pas pertinent de faire l'hypothèse d'une divergence quant à la panoplie, et les hypothèses d'une divergence quant à la manière de représenter la vitesse dans le dessin des forces et quant à la procédure, $\pm dessiner$ ou $+dessiner$, restent valables.

L'enseignant utilise {force motrice} pour ce qui schématisé par {force de traction} dans le cours théorique, et qui correspond à une force exercée par contact sur l'objet analysé par un autre objet, par exemple une corde. La créativité de l'enseignant est à relever ici. À l'époque de Newton, il n'y avait pas de moteur de propulsion, et l'idée d'une auto-mobile ne venait pas à l'esprit de ses contemporains lorsqu'ils réfléchissaient aux forces, mais plutôt la technologie des moulins et des grues. Cela explique peut-être

572. Même si le polycopié fait référence à cette force avec la classe-objet {traction}, l'enseignant dans son discours aux élèves utilise fréquemment {force motrice}, de telle sorte que je peux faire l'hypothèse d'une reprise par ces élèves de la classe-objet utilisée par l'enseignant (une opération θ).

pourquoi la mécanique est si souvent enseignée avec des situations-problème mettant en œuvre des cordes et des poulies, très fréquemment utilisée au $XVII^{ème}$ siècle. Mais si l'enseignant fait référence au *moteur* tel qu'on le trouve dans une voiture, en utilisant {force motrice}, ce n'est pas seulement pour mettre la physique au goût du jour, mais pour offrir une *astuce* aux élèves. En effet, se poser la question de savoir s'il y a un *moteur* qui tracte continuellement l'objet permet aux élèves de décider s'il faut ou non ajouter une force dans la direction et le sens du mouvement, et en particulier d'éviter d'introduire une *force d'inertie* pour les objets lancés, lâchés, etc. Cette astuce soutien la réflexion lors de la première phase du *dessin des forces*, lorsqu'il s'agit de décider quelles forces représenter sur le dessin.

Si la *force motrice* fait partie de la panoplie et est utilisée par l'enseignant dans d'autres situations, par exemple la situation de traction d'un chariot par une corde, il en va tout autrement d'une *force de vitesse* ou *force d'inertie*. En effet, les flèches effacées et les propositions de Pierrette et Daniel peuvent également faire référence à une *force d'inertie*, la *vis inertia* (Koyré, 1968), une force intérieure qui maintient le mouvement, avant de se rendre compte que l'énergie ou la quantité de mouvement, c'est-à-dire le simple rapport *masse* · *vitesse*, suffit à rendre compte de cette tendance intérieure, qu'il nomme alors *inertie*. Du point de vue de l'enseignant, la *force d'inertie* n'existe pas dans la panoplie des forces acceptées en physique, justement à la suite du développement de la physique newtonienne sus-mentionné. Il s'agit donc de poursuivre l'analyse avec la question suivante : la "force qui pousse la bille" de Daniel, la "vitesse" de Pierrette, sont-elles de leur point de vue des *forces motrices*, des *forces de vitesse* ou *forces d'inerties* ou encore autre chose ?

Dans l'échange entre Daniel et l'enseignant, nous disposons de quelques indices pour répondre à cette question. Daniel, une fois convaincu qu'il n'y pas de moteur et qu'il n'y a pas de *force motrice*, n'en déduit pas pour autant qu'il n'y a pas de force dans la direction et le sens du mouvement (voir transcription p. 656, ligne 11). Au lieu de cela, il demande encore une fois le nom de cette force mystérieuse... Autrement dit, l'astuce de l'enseignant, qui au niveau des opérations logico-discursive consiste à opérer sur la classe-objet de l'élève {force qui pousse la bille} jusqu'à en faire {force qui pousse la bille, force motrice, moteur}, fournit implicitement une question à l'élève ("y a-t-il un moteur ?") pour l'aider à décider s'il y a |une force dans la direction et le sens du mouvement|. Daniel comprend plutôt cette question comme lui permettant de décider s'il y a {force motrice} ou non, et concluant que non, il cherche une autre classe-objet pour cette force (α : |une force dans la direction et le sens du mouvement| $\Rightarrow$ {?}). Autrement dit, Daniel ne renoncerait pas à sa "force qui pousse la bille" mais uniquement à l'associer à la classe-objet {force motrice}.

Dans l'échange entre Pierrette et l'enseignant, cette hypothèse permet de rendre compte d'un énoncé surprenant de Pierrette, qui s'inquiète que la bille ne remonte la pente si aucune force n'est dessinée dans le sens du mouvement : "mais si on ne néglige pas le frottement elle va en arrière" (voir transcription p. 653, ligne 19). En effet, de son point de vue, "on est bien obligé de compenser le frottement" (*idem,* lignes 15-16). Dans son raisonnement, Pierrette n'a pas effectué une somme des forces permettant de rabattre la force de gravité - le poids - dans la direction et le sens de la pente, ce qui lui aurait permis de se rendre compte que même une éventuelle force de frottement dans la direction du mouvement mais à

sens inverse ne fait que réduire l'accélération de la skieuse dans le sens de la pente. Néanmoins, il en va tout autrement lorsque la skieuse est tirée par l'arbalète du ski-lift : en dernier ressort, c'est bien l'intensité des forces qui permet de mener le raisonnement escompté dans ce cas, moyennant une somme des forces pour laquelle le dessin apporte une aide (en particulier en représentant les angles entre les vecteurs) utile, sans pour autant suffire à lui seul à la résolution de l'exercice.

Admettre une *force d'inertie* dans la panoplie permettrait donc de reconstruire la cohérence et le sens des difficultés de Pierrette et Daniel à un plus grand niveau de détail que les hypothèses précédentes. C'est pourquoi nous pouvons considérer probable l'hypothèse que Pierrette et Daniel divergent de la schématisation de l'enseignant quant à la panoplie des forces à représenter. Avant d'accepter qu'il y a situation de malentendu, cependant, il faut selon nos critères encore montrer que cette force de vitesse ou force d'inertie est une reprise de la schématisation de l'enseignant. Trouve-t-on quelque chose dans les supports de cours, consignes et discours de l'enseignant avant le travail sur l'exercice 4A qui puisse donner à penser qu'une force existe dans la direction et le sens du mouvement ?

J'ai trouvé deux indices de ce genre. Premièrement, la présence d'une flèche représentant le "sens du mouvement" sur le schéma à l'occasion, justement, d'une schématisation du principe d'inertie (voir figure 6.47, p. 638). Cette flèche est en tout point semblable, au niveau du dessin, aux flèches désignant des forces. Seul son placement "flottant" et la légende, "vitesse de déplacement", permettent implicitement [573] de faire la différence. Deuxièmement, la formulation d'une explication donnée par l'enseignant dans le cours écrit sur les lois de la dynamique fait accidentellement de l'*inertie* une *force* :

Cours théorique - Chapitre 2: les lois de la dynamique - 2.1.2 Définition - p.9

```
1
2  Le travail est le changement de l'énergie d'un système, dû à l'application d'une
3  force, agissant sur une distance. Au cœur de ce concept est la notion du
4  mouvement contre une résistance, qu'elle soit fournie par la pesanteur, un
5  frottement, une inertie ou n'importe quelle autre force.
6
```

Dans l'extrait cité ci-dessus, le cours théorique affirme, ni plus ni moins, que l'*inertie* est une *force*. C'est tout de même embarrassant pour le processus d'interprétation des élèves, et cela permet de montrer que tout n'est pas à mettre sur le compte des conceptions de ces élèves - ni d'ailleurs de celles de l'enseignant - mais qu'il y a quelque chose dans la manière dont les significations de la théorie mécanique newtonienne se sont structurées qui conduit à une interprétation de l'inertie comme une force [574].

Ces dernières traces permettent de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu, même si je ne dispose évidemment pas des moyens de montrer que, du point de vue de Daniel, c'est en observant un

573. Implicitement, parce que les *forces* désignées par les deux autres flèches ne sont pas nommées "forces" verbalement dans les légendes, et parce que le placement de la flèche n'est pas explicitement un critère pour faire la distinction entre *force* et *vitesse*.

574. Pour être plus clair encore, qu'en serait-il de cette difficulté d'interprétation si l'on décidait d'appeler les *forces* des *énergies instantanées* ou, inversement, l'*énergie cinétique* une *force dans la durée* ?

mélange de flèches, les unes désignant des forces et une autre une vitesse, ou en lisant le cours théorique cité ci-dessus, qu'il a pensé en proposant une force qui pousse la bille à l'exercice 4A. J'ai néanmoins pu montré qu'il y avait dans la schématisation de l'enseignant *en général* de quoi interpréter l'inertie comme une force : cela permet de défendre l'hypothèse d'une situation de malentendu, autrement dit de reconnaître une ambiguïté dans la schématisation que les élèves doivent interpréter qui peut expliquer l'erreur constatée chez Daniel sans devoir faire des hypothèses sur ses conceptions individuelles : on trouve dans la communication de quoi rendre compte de sa proposition d'une "force qui pousse" la bille.

6.8.4.5 Énonciation des divergences selon les points de vue

Nous avons examiné successivement trois hypothèses, à des niveaux d'analyse différents (règle d'action du dessin des forces, procédure et panoplie des forces existantes), et pour chaque niveau des indices montrent qu'il y a probablement situation de malentendu. La question qui se pose alors est la suivante : ces hypothèses sont-elles en concurrence ou peuvent-elles être considérées comme des explications concomitantes ? La dernière hypothèse, quant à une divergence portant sur la panoplie des forces acceptées en physique newtonienne, peut éventuellement remplacer les deux précédentes, puisqu'il serait suffisant que Pierrette ou Daniel et l'enseignant divergent quant à la panoplie pour interpréter leur échanges. Mais ce n'est pas nécessairement le cas, car rien ne nous indique positivement qu'il n'y a pas aussi des ambiguïtés, du point de vue de ces élèves, quant aux règles d'action (dessiner une vitesse sur le dessin des forces) et de la procédure (en particulier entre $\pm dessiner$ et $+dessiner$) : ces hypothèses ne font peut-être que mettre à jour des aspects complémentaires de la situation de malentendu à laquelle ces élèves participent, au sens où les divergences que j'ai distinguées *pour l'analyse* entre règles d'action, procédure et panoplie des forces, constituent probablement un *tout indifférencié* du point de vue des élèves occupés à s'approprier *à la fois* le dessin des forces et les connaissances de physique pour lesquelles cette pratique devrait jouer le rôle de moyen.

6.8.5 Discussion

6.8.5.1 La situation de malentendu est-elle résolue par les échanges avec l'enseignant ?

Pour cette situation de malentendu portant sur le dessin des forces, la nécessité méthodologique du recours à des traces discursives nous a conduit à analyser deux échanges entre les élèves et l'enseignant qui m'ont surtout permis de mettre en évidence une situation de malentendu antérieure aux échanges eux-mêmes, où elle semble se résoudre. L'analyse de ces échanges a permis d'identifier précisément quelques divergences entre enseignant et élèves quant à la pratique du dessin des forces, en distinguant trois niveaux : les règles d'action, la procédure et la panoplie des forces acceptées en physique. La question de savoir si la situation de malentendu est effectivement éclaircie par ces échanges exige encore une analyse ou, au moins, une discussion.

Dans les deux échanges où le dessin des forces est explicitement discuté entre enseignant et élèves, nous pouvons faire l'hypothèse d'une situation de malentendu portant sur trois divergences entre les élèves et l'enseignant :

1. La possibilité ou non de dessiner une vitesse sur un dessin des forces.
2. La procédure consistant à $\pm dessiner\ les\ forces$ ou, au contraire, à $+dessiner\ toutes\ les\ forces$.
3. L'existence, dans la panoplie des forces acceptées en physique, d'une force semblable à la *vis inertia* que Newton a conceptualisé dans son premier modèle, avant de l'abandonner.

La troisième divergence, quant à cette *force de vitesse*, ou *vis inertia*, se retrouve à l'occasion de divers exercices chez d'autre élèves : pour Yves, par exemple, elle apparaît dès l'item #4 du pré-questionnaire (voir section 6.5, p. 535) et perdure au moins jusqu'à l'activité *Digalo*, alors qu'elle semble disparaître pour les deux élèves qui sollicitent justement un échange au sujet du dessin des forces avec l'enseignant (Daniel et Pierrette). Daniel s'en sort avec la question de savoir s'il y a un moteur ou non, en reprenant la classe-objet {force motrice} astucieusement proposée par l'enseignant, et Pierrette finit par accepter qu'il ne faut pas représenter de vitesse sur un dessin des forces (malgré le contre-exemple du polycopié).

Nous disposons d'un indice que Daniel s'approprie l'astuce de l'enseignant, dans un échange situé un peu plus tard durant la même leçon. Daniel reprend la classe-objet {force motrice} lors d'un échange entre pairs, où il confronte justement l'énoncé d'une *force de vitesse* ou *force d'inertie* par Yves :

Enregistrement de Daniel Nina et Yves -Exercice 4C avec le microworld

```
1 Daniel:   que se passe-t-il à l'instant du choc (...)
2 Yves:     ah (.) on a noté la force (.) la force qui la pousse
3 Daniel:   la force qui la pousse? (.) y'en a pas (.) y'a pas de moteur
4
```

12.12.2006 bb 18'30"-20'00'

Dans ce bref extrait, Daniel s'approprie l'astuce de l'enseignant : il utilise l'élaboration (γ) de la classe-objet {force qui la pousse} en {force qui la pousse, moteur} pour décider s'il faut dessiner une force (au sens de $\pm dessiner$) dans la direction et le sens du mouvement au moment du choc entre les deux billes. Daniel s'est donc approprié la solution, l'astuce, proposée par l'enseignant, et également la procédure qui consiste à *décider* de dessiner une force, ou pas.

Et pourtant, la situation de malentendu quant à la panoplie des forces est-elle pour autant résolue du point de vue de Daniel ? Au final, le physicien va utiliser d'autres concepts lorsque celui de *force* ne lui permet pas d'analyser la situation. En particulier, la force étant désormais réservée à quelque chose d'instantané dans la physique newtonienne, l'idée d'une *vis inertia* qui maintient le mouvement, et qui appartient à l'analyse d'un phénomène dans la durée, se retrouve dans les concepts de *quantité de mouvement*, d'*énergie cinétique* et de *travail*.

Mais savoir quel concept utiliser pour quel type de tâche est une compétence méta-cognitive de haut niveau, qui semble parfois poser des difficultés aux enseignants eux-mêmes : il s'agit de connaître le champ conceptuel (Vergnaud, 1985, 2009a) des concepts utilisés, en particulier les situations et problèmes qu'ils permettent de résoudre, et ses limites, c'est-à-dire les situations et problèmes pour lesquels tel concept n'est pas un outil intellectuel adéquat. Je fais ce commentaire à la décharge des enseignants, en soulignant la difficulté réellement redoutable du problème soulevé, et je me base notamment sur l'observation que les enseignants ne répondent jamais, sur l'ensemble de la séquence étudiée, en indiquant le champ conceptuel limité de concepts comme *force*, *quantité de mouvement*, ou *travail* pour aiguiller les élèves en difficulté.

À Daniel, Pierrette ou Yves qui souhaitent dessiner une *force* dans la direction et le sens du mouvement, on pourrait répondre que c'est la *quantité de mouvement*, ou l'*énergie cinétique*, à qui ce rôle sémiotique est confié dans la théorie newtonienne, voire éventuellement expliquer pourquoi Newton a justement renoncé à catégoriser sa *vis inertia* comme une force au cours du développement de sa physique. Sans établir ce lien entre l'intuition des élèves qu'il y a quelque chose qui maintient le mouvement de la bille et les concepts retenus en physique pour représenter le phénomène, il est peu probable que Daniel, Pierrette ou même Yves ait appris autre chose qu'une astuce (la question "y a-t-il un moteur") ou une règle d'action ("il ne faut pas inclure les vitesses dans un dessin des forces") et que la résolution du malentendu, qui touche pourtant à la question complexe de la panoplie des forces en physique, se fasse effectivement à ce niveau-là des savoirs.

Au fond, ce que Pierrette (et peut-être les autres élèves) n'a pas interprété en physicienne, c'est que la physicienne *choisit* ce qui est représenté par la flèche, c'est-à-dire que *le dessin des forces* en tant que pratique est une activité de modélisation, un *moyen* pour schématiser et non la *finalité* d'une schématisation ; autrement dit, on a choisi de n'y dessiner que des forces. Mais, comme ce choix est, en milieu scolaire, celui de l'enseignant et non pas celui de Pierrette, il y a là une *situation de malentendu* sur le statut même de *choix* dans la modélisation. Pour que Pierrette puisse s'approprier le statut épistémique de ce choix, l'enseignant devrait probablement la laisser choisir autre chose (p.ex. de dessiner des flèches représentant les vecteurs de *vitesse*) pour ensuite qu'elle prenne conscience des problèmes pratiques que cela pose (p.ex. les vecteurs de *vitesse* et de *force* ne peuvent être additionnés ou soustraits dans une somme).

En conséquence, la situation de malentendu est susceptible de s'étendre à la partie du cours portant sur l'*énergie cinétique* et le *travail*, puisque cette partie est en lien avec la question de la panoplie des forces. Or, le découpage du cours en "chapitres" correspondant chacun à un ou deux concepts, aussi confortable soit-il pour l'enseignant et les élèves ayant adopté une attitude où le métier d'élève prime sur l'appropriation des connaissances, n'invite justement pas à la construction de ces liens, ni à explorer l'utilité des concepts relativement aux problèmes et situations présentées, c'est-à-dire à explorer les champs conceptuels des outils intellectuels proposés. Se retient-on par peur que les élèves, ne sachant gérer la complexité d'une science de la modélisation, avec ses propres tâtonnements historiques et ses limites ? Mes analyses plaident plutôt pour l'hypothèse inverse : à trop simplifier les savoirs enseignés, les élèves peinent à leur donner du sens et, parfois, finissent par renoncer à essayer.

6.8.5.2 Enjeux didactique du dessin des forces

Je propose ici une problématisation, qui a uniquement pour but de soulever des questions éventuellement partiellement inexplorés par les recherches, sinon au moins utiles en vue de futures investigations.

Une modélisation par le dessin

Le peu de traces discursives dans le corpus indique que le dessin des forces ne bénéficie pas d'une place comparable, parmi les savoirs enseignés, aux lois de Newton ou aux formules algébriques, par exemple. Est-ce le cas parce qu'il s'agit d'une pratique, d'un usage, dont il est plus difficile de faire une *schématisation* que ce n'est le cas pour une définition ou une loi énoncée en langage mathématique ? Ou est-ce plutôt l'indice d'un enseignement qui ne donne pas une place explicite à la modélisation [575] ?

Comme nous l'avons vu au cours de cette analyse, le dessin des forces n'est pas enseigné explicitement dans cette classe. Il n'est pas non plus très structuré, puisque de nombreuses variantes sont utilisées tant du point de vue de l'enseignant que des élèves. Par contre, les échanges entre l'enseignant et les élèves permettent de soulever des attentes relativement précises de la part de l'enseignant à l'usage du dessin des forces, même si elles restent le plus souvent implicites. Elles ne sont d'ailleurs pas toujours satisfaites par l'enseignant lui-même, en particulier dans le polycopié mis à disposition des élèves, ce qui contribue certainement à la situation de malentendu mise en évidence, vu la tendance forte des élèves à procéder par imitation des caractéristiques illustratives du dessin des forces pour s'approprier cette pratique. Ces attentes montrent que le dessin des forces est bien, du point de vue de l'enseignant, une activité de modélisation qui devrait permettre aux élèves de construire un modèle qualitatif pour répondre à diverses questions impliquant une somme des forces, et avant de passer à un modèle mathématique permettant de calculer l'intensité de la somme des forces, ou d'autres valeurs scalaires. À ce propos, il est intéressant de souligner le fait que dans bien des tâches de la séquence observée, l'enseignant n'exige ni ne calcule lui-même ces valeurs, mais répond à l'aide de raisonnement à partir du modèle qualitatif spécifiquement construit pour répondre à la question. Cette démarche, quoique mise en œuvre dans la communication avec les élèves, ne fait pas non plus l'objet d'un enseignement explicite : elle est simplement *discursivement montrée* aux élèves, c'est-à-dire schématisée par l'enseignant lors de son discours oral, et les élèves sont censés imiter la pratique à partir de cette schématisation. Les seuls discours adressant explicitement la question des règles et de la procédure à mettre en œuvre lors d'un dessin des forces sont des questions à l'initiative des élèves.

Le modèle des interactions développé par Tiberghien et Weil-Barais (1987) présente une alternative à la procédure reconstruite à partir de l'implicite dans notre recherche. Le modèle des interactions fait du dessin des forces un objet d'enseignement explicite (Lemeignan & Weil-Barais, 1993) [576], ce qui permet d'aller plus loin dans la définition d'une procédure et des opérations prescrites aux élèves. Le travail de ces chercheurs montre bien que le *dessin des forces* est une activité de modélisation (voir p. ex. : Vince

575. Cette observation a été fait à l'occasion des discussions de plusieurs situations de malentendu.
576. La séquence SESAMES de Tiberghien présente dans le détail une séquence d'enseignement, dont on trouve une explication par exemple dans l'ouvrage de Sensevy (2011), qui fait usage de ce modèle des interactions.

& Tiberghien, 2000). Le dessin des forces permet d'utiliser la modélisation de la physique newtonienne à des situations particulières, pour un champ conceptuel spécifique, à l'usage de la mécanique newtonienne pour un ensemble de situations et de tâches limité. En ce sens, la pratique du dessin des forces soulève la question du champ d'application des lois de Newton, problème qui n'est jamais explicitement discuté dans la séquence étudiée, et qui donne également lieu à une diversité d'interprétations de la part des élèves (voir p.ex. la situation de malentendu #1 où l'élève utilise la loi de la force de gravitation appliquée à la chute de la Lune sur la Terre dans le but de déterminer la valeur de l'accélération des objets en chute libre sur Terre, g).

Il me semble qu'un développement plus explicite de la modélisation dans l'enseignement de la physique, tant au niveau de l'analyse épistémologique des savoirs enseignés qu'au niveau de la transposition didactique de ces savoirs, pourrait grandement contribuer à clarifier les enjeux de la communication effectuée entre l'enseignant et ses élèves, et en faire bénéficier leur apprentissage en physique. De nombreuses questions pourraient être adressées dans ce but, par exemple :

1. Faut-il mélanger dessin figuratif et dessin technique d'un modèle mathématique, p.ex. de flèches dénotant des vecteurs et désignant des forces ou autres concepts ?
2. Quel est le sens et l'importance du placement des flèches dénotant des vecteurs sur un dessin des forces pour le processus d'apprentissage des élèves ?
3. Comment sémantiser (c'est-à-dire *nommer* au sens logico-discursif de l'opération α) ce qui est commun à la pesanteur, au frottement, à l'inertie sans les considérer tous comme des *forces* ?
4. Peut-on enseigner aux élèves à raisonner en faisant usage du dessin des forces de telle sorte qu'ils le pratiquent comme un moyen pour réfléchir au problème au lieu d'imiter les esquisses de l'enseignant sans comprendre ?

Sur la troisième question, un enseignant de physique répliquerait peut-être qu'il ne s'agit là *que* d'un problème de locution [577], de mise en mots, le langage mathématique permettant les définitions des grandeurs sans ambiguïtés. Certes, mais comme le souligne Grize (1982) au sujet de la théorisation, développer une théorie nécessite la mise en mot, ce que j'appelle ici la sémantisation (α). Apprendre une telle théorie nécessite également ce même processus de sémantisation, ajouterions-nous ici, puisque les élèves doivent reconstruire par eux-mêmes les concepts que l'enseignant leur propose. Cette hypothèse constructiviste suffit à montrer que ce qui est fréquemment considéré comme un "simple" problème de locution dans la pratique, constitue en réalité le redoutable défi que pose l'apprentissage de savoirs dont les référents ne sont pas directement visibles : les élèves n'ont guère davantage à disposition que la sémantisation effectuée par l'enseignant pour s'approprier un référent invisible par les sens, c'est-à-dire qu'il ne peuvent effectuer leur propre sémantisation qu'à partir d'une autre sémantisation, celle de l'enseignant. Le choix et les usages

577. Objection souvent faite aux chercheurs ou aux scientifiques, auxquels les gens de la pratique reprochent fréquemment de "chipoter sur les mots", voir de ne savoir (que) bien parler ou écrire, sous-entendant par là que le mot n'est pas la chose et que ce n'est pas l'essentiel. Si cette réflexion a une certaine pertinence dans certains cas, elle est problématique dès lors qu'il s'agit d'enseigner ou d'éduquer, car si l'élève ne dispose que du (bon) mot pour construire ses connaissances, comment est-il censé procéder si ces mots ne sont pas utilisés avec rigueur ?

sémiotiques prennent, dans ce cadre, une importance capitale pour le processus d'apprentissage, et jusque dans leurs moindres détails.

Nous avons tenté de montré que le dessin des forces est une pratique de la modélisation, dont les enjeux pour l'apprentissage de la mécanique newtonienne par les élèves sont importants. L'un d'entre eux, qui n'est pas des moindres, consiste à faire comprendre aux élèves que le dessin de forces est l'occasion de *décisions* du physicien, et en particulier de décisions quant aux forces à négliger ou ne pas négliger.

Négliger ou ne pas négliger des forces

Parmi les décisions importantes à l'activité de modélisation sollicitée par le dessin des forces, la plus courante est celle qui consiste à négliger certaines forces. Ce sont les forces de frottement qui sont le plus fréquemment négligées[578], mais parfois le poids et la force normale sont également considérés négligeables, en particulier lorsque l'objet est sur un plan parfaitement horizontal et que ces deux forces s'équilibrent mutuellement.

Les traces analysées dans la recherche tendent à montrer que les élèves parviennent assez bien à s'approprier cette décision-là en particulier, peut-être du fait que la *force normale* ou *force de soutien* fait partiellement l'objet d'une mention explicite par son libellé (elle "soutient" et est "normale" par rapport à l'horizontale). Les élèves ne rencontrent pas de difficulté à les ignorer dans ce cas plutôt courant, alors que les autres cas posent fréquemment des difficultés plus ou moins insurmontables, que les élèves tranchent le plus souvent par la référence à une norme ("dans ce cas, il faut..") ou à une décision de l'enseignant.

Le raisonnement qui conduit à prendre la décision de négliger certaines forces (forces de frottement, force motrice, etc.) fait appel à des savoirs qui ne se trouvent pas dans le polycopié distribué aux élèves, ni dans leur livre de référence. Aucun critère, ni aucune procédure n'est explicitement enseignée aux élèves pour choisir quelles sont les forces pertinentes, alors que c'est justement une des difficultés principales des élèves. Dans les discours de l'enseignant ou lors de correction d'exercices, ces décisions sont présentées comme si elles allaient de soi, comme si elles relevaient du bon sens. Dans les extraits analysés ci-dessus où les élèves demandent de l'aide à l'enseignant, celui-ci communique la décision sans argumentation, après quelques questions qui s'apparentent plus à un jeu de devinette[579] qu'à la mise en œuvre d'une méthode ou d'un raisonnement.

Les principes sur lesquels se base le physicien dans son raisonnement, notamment l'estimation de l'intensité de certaines forces, ne sont pas explicites alors qu'ils permettent effectivement de décider si ces forces sont suffisamment importantes pour être prise en considération dans le calcul de la somme des forces, ou pour inverser le sens du mouvement. Pourtant, la seule explicitation de ces principes n'aiderait sans

578. La force d'attraction de la Terre par la masse du chariot ou du personnage, réciproque du poids du chariot ou personnage en question, est par exemple systématique négligée du fait de son importance - et pourtant son absence n'aide pas les élèves à assimiler la loi des forces opposées ($3^{ème}$ loi de Newton). Il y a donc des enjeux, au fait de décider de négliger certaines forces, non seulement pour la physique mais aussi pour l'apprentissage des élèves.

579. Par exemple : "quelle force", "est-ce qu'il y a encore une force qui pousse la bille ?" (voir transcription p. 656, ligne 3 et 5), ou "c'est quoi pour vous f ?" (voir transcription p. 653).

doute que fort peu les élèves, puisque le jugement lui-même quant à l'intensité de ces forces qu'opère le physicien, et qui consiste à *anticiper* sur la solution du problème, nécessite une expertise ou une expérience que les élèves n'ont justement pas. Je comprends bien, dès lors, que cette partie pourtant essentielle des savoirs enseignés de la discipline ne fasse pas l'objet d'une présentation explicite. Néanmoins, les élèves ne disposent pas dans la séquence étudiée de critères explicites pour effectuer la modélisation attendue à l'aide du dessin des forces, et même les règles qu'ils peuvent inférer à partir de l'usage du dessin des forces par l'enseignant conduisent à une diversité de pratiques ou demeurent partiellement indéterminées. Cette discussion soulève donc la question suivante : n'y a-t-il pas moyen de mettre en forme explicitement la pratique et le raisonnement escomptés des élèves lors d'un dessin des forces ?

Vers une sémiotique des forces

Au vu de ce qui précède, j'argumente ici en faveur de la conception d'une *sémiotique du dessin des forces* plus standardisée dans l'enseignement de la physique, qui permettrait d'expliciter au moins en partie le raisonnement et la pratique escomptés des élèves lorsqu'ils utilisent un dessin des forces. Dans ce but, je fais quelques remarques sur des points de détail à partir des observations et analyses effectuées à l'occasion de la présentation de cette situation de malentendu.

Parmi la diversité des pratiques observées, certains usages apparaissent plus rigoureux que d'autres, et sont susceptibles de fournir des éléments utiles à une sémiotique standardisée du dessin des forces. Par exemple, l'usage d'un indice faisant une double référence à l'objet sur lequel la force s'exerce et à l'objet qui l'exerce (p.ex. $\overrightarrow{F_{AB}}$, où A fait référence à l'air et B à la bille) est une pratique plus rigoureuse et explicite que celle que l'enseignant utilise à d'autres moments et qui consiste à nommer une force uniquement avec une lettre (p.ex. la force de frottement simplement $\overrightarrow{f}$). Selon l'usage du double indiçage, le poids serait par exemple systématiquement écrit en référence à la force de gravitation exercée par la Terre sur l'objet considéré, ce qui peut conduire les élèves à conceptualiser le poids autrement, à terme et à force d'usages. Au contraire, nommer les forces avec une lettre faisant implicitement référence à leur "nature", par exemple f pour "force de frottement", P pour "poids" ou même[580] g pour "force de gravité", peut interférer avec la construction du concept de *force* par les élèves. En somme, l'absence d'une sémiotique standardisée du dessin des forces laisse dans l'implicite de nombreux aspects des savoirs enseignés, et peut avoir des incidences à plusieurs niveaux :

1. Au niveau de la communication des règles d'usage propre au dessin des forces : existe-t-il des règles spécifiques à chaque type de force ? Par exemple, la force de gravitation s'exerce *à distance*, alors que les autres nécessitent un contact. Les élèves se voient expliquer, à l'occasion de la situation-problème #3, que le pied ne peut exercer une force sur le ballon de foot lorsqu'il ne le touche plus, au troisième temps de la bande-dessinée (voir figure B.17, p. 818. Pourquoi serait-ce différent pour la *force de*

580. À la situation de malentendu #2 g *comme gravité*, nous avons vu la confusion que font facilement les élèves entre l'accélération des objets en chute libre à la surface de la Terre, dénommée $\overrightarrow{g}$, et la force de gravitation exercée par la Terre sur les objets à sa surface, nommée $\overrightarrow{F}$ ou $\overrightarrow{F_{PT}}$ dans les rares occurrences sur le polycopié, mais souvent libellée $\overrightarrow{g}$ par les élèves dans leurs productions écrites.

gravitation[581] ? C'est peut-être un problème intellectuel de ce genre qui conduit certains élèves à dessiner la force de gravité comme si elle flottait (voir p.ex figure 6.55, p. 648).

2. au niveau de l'interprétation de l'objet discursif {force} : s'agit-il d'une même {force} lorsqu'elle est {force de frottement} ou {force de gravité} ? Qu'est-ce qui est commun aux *forces* et qu'est-ce qui est spécifique à une force d'un certain *type* ? Est-ce que $\{\overrightarrow{P}\}$, le poids, est compris comme une force par les élèves ou comme une propriété de l'objet, plus proche d'une notion quotidienne du *poids* et du concept de *masse* en physique ? La nature de ce qui est représenté par des flèches peut, à l'occasion, se révéler plus ouvert du point de vue des élèves qu'une stricte définition appliquée à chaque flèche de la même manière.

3. Au niveau de l'apprentissage et de l'usage des concepts : qu'est-ce qui fait qu'il est plus pertinent d'écrire dans son dessin des forces, ou d'énoncer {force de frottement} plutôt que {force de l'air} ? Cette dernière question, en particulier, renvoie à un vrai problème discuté au cours de l'histoire des science : Newton affirmait explicitement ne pas savoir ce qu'est la *force de gravitation*. Il lui suffisait, pour sa mécanique, de considérer les relations mathématiques de cette force dont il fait l'hypothèse avec d'autres phénomènes. Il est néanmoins possible aujourd'hui d'en faire une analyse subatomique de ces forces pour discuter de leur similarité et différence de nature (forces magnétiques, physiques, etc.) : est-ce vers l'explication atomique de la manière dont s'exerce une force que l'on souhaiterait guider le raisonnement des élèves pour leur apprendre à faire un bon usage du *dessin des forces* ? Faut-il représenter ces forces différemment au niveau des flèches esquissées sur un dessin des forces ?

D'autres détails du dessin des forces mériteraient d'être discutés ici, qui entretiennent des liens étroits avec les particularités de la physique newtonienne. Par exemple, le placement de l'origine de la flèche représentant un vecteur force sur le centre de gravité de l'objet sur lequel elle s'exerce fait implicitement référence à la théorie newtonienne, où les objets matériels sont traités comme des *points mathématiques parce que* cette théorie se focalise essentiellement sur les rapports mathématiques entre des mesures. Le centre de gravité n'est cependant pas tout à fait équivalent à une réduction de l'objet à un point mathématique. De nombreuses questions d'interprétation peuvent se poser : faut-il par exemple placer les forces dans le dessin des forces de la situation-problème #2 sur le centre de gravité du pèse-personne, alors que mécaniquement cet appareil est connu pour mesurer une force exercée sur sa surface supérieure dans une direction perpendiculaire à cette surface ? Une autre question, de cohérence interne au système théorique enseigné, consiste à se demander si le fait de dessiner les objets et non seulement des points pour le dessin des forces ne constitue pas une contradiction avec l'épistémologie newtonienne. Bien entendu, on comprend l'avantage communicationnel qui consiste à dessiner l'objet : cela permet de faire le lien entre la modélisation mathématique de Newton et le référent du monde "réel". Mais dans l'objectif de favoriser ce lien entre modèle et réalité chez l'élève, l'usage du dessin des forces interroge également par certains aspects contradictoires par rapport à cette intuition de l'expérience. Par exemple, comment se fait-il que la force exercée *sur* un objet soit représentée par une flèche qui *part* de l'objet vers l'extérieur ? Cette

581. Cette question n'est pas naïve, puisque c'est un des principaux arguments des contemporains de Newton contre sa nouvelle Philosophie de la Nature (Koyré, 1968).

contradiction n'a pas manqué de susciter certains comportements inattendus, en l'occurrence des flèches inversées (voir figure 6.53, p. 646).

Sur la base des questions et problèmes soulevés ici, je suis d'avis que la situation de malentendu sur le dessin des forces analysée dans cette recherche émerge du fait de l'absence d'une sémiotique standard du dessin des forces, qui serait établie de manière rigoureuse et explicitement présentée aux élèves. Cette hypothèse quant à la source de la situation de malentendu s'inspire des recherches mettant en évidence les conséquences de la décontextualisation et recontextualisation des savoirs lors de leur transposition didactique (Chevallard, 1985 ; Perret-Clermont, Brun, et al., 1982). Selon cette explication, ce ne serait pas la *conception* de Daniel qu'*il y a* une *force de vitesse* ou *force d'inertie* dans le sens du mouvement qui motive son intention de la dessiner et conduit à une situation de malentendu, mais ce serait l'interprétation de la tâche qui incite à imaginer une *force de vitesse* ou *force d'inertie*. La situation de malentendu relativement commune et documentée par la littérature, qui consiste à dessiner une *force de vitesse* ou *force d'inertie*, et que nous avons illustré par notre analyse, s'expliquerait par la pratique scolaire du dessin les forces plutôt que par des *conceptions* des élèves antérieures à la pratique scolaire. Autrement dit, la pratique du dessin des forces suffirait à induire chez un certain nombre d'élèves l'idée d'une *force de vitesse* ou *force d'inertie*, de telle sorte qu'il devient méthodologiquement superflu de supposer une conception antérieure à l'enseignement chez ces élèves. C'est la transposition des savoirs spécifique au dessin des forces sans sémiotique standard et explicite qui déterminerait certaines difficultés d'interprétation, du fait du processus de décontextualisation qu'elle opère sur ces savoirs, et de recontextualisation dans une pratique scolaire qui laisse une trop grande part à l'implicite.

Exprimé simplement, Daniel et Pierrette inventeraient une force dans la direction et le sens du mouvement pour répondre à la tâche, inversant le raisonnement de modélisation escompté en physique dans un raisonnement qui part de la tâche et de sa consigne pour faire des inférence sur les forces qui existent, raisonnement que je pourrais paraphraser ainsi : "parce qu'il faut la dessiner, la force existe". Selon cette hypothèse, l'injonction de l'enseignant de ne pas dessiner cette force dans la direction et le sens du mouvement prend le sens d'une rupture du contrat didactique. L'attitude soumise qu'adopte Daniel dans l'échange à la suite de cette injonction va dans le sens de cette interprétation : les répétitions d'acquiescement (voir transcription, p. 656, lignes 13, 30, 34, 38), et sa demande s'il faut écrire "p" avec une majuscule (voir transcription, p. 656, ligne 26) en sont les indices les plus marquants. À partir de là, il est difficile pour l'élève de faire autre chose que de simplement appliquer les injonctions du maître : la contradiction perçue au niveau du contrat didactique conduite souvent l'élève à renoncer à réfléchir, et à se soumettre sans plus chercher à comprendre.

6.8.5.3 Extension de la logique naturelle du discursif à l'illustratif

Je n'ai pas pu exprimer les divergences directement à partir de la diversité des esquisses, présentée pour établir l'incident critique. Il aurait fallu pour cela considérer certaines actions du dessin des forces comme un langage : après tout, les signes conventionnels comme les lettres sont aussi *dessinés*, et le dessin d'un

triangle en géométrie par exemple est plus proche du signe langagier que du dessin figuratif, en tout cas quand ce triangle a des côtés qui ne sont pas tout à fait rectiligne... Il convient ainsi de se poser la question, à l'issue de cette analyse, d'une possible extension du concept de schématisation à la représentation esquissée dans les dessins des forces, autrement dit à ne pas se limiter à une acception restrictive du *discursif*, qui limiterait le concept de *schématisation* au langage vernaculaire, c'est-à-dire pour cette étude au français. J'ai déjà, pour les besoins de cette recherche, étendu la *schématisation* de Grize au langage mathématique et à ses usages. Je proposerais ici de l'étendre à l'usage d'une forme d'esquisse, le dessin des forces. En effet, il me semble que cette pratique peut être considérée comme une forme de *proto-langage* spécifique à un milieu : celui des usagers de la physique. Cependant, je ne suis pas compétent pour construire ce développement ou même évaluer la faisabilité de cette hypothèse. Il faudrait pour cela notamment une démarche interdisciplinaire avec des spécialistes des arts visuels, notamment, mais aussi de la sémiotique et des sciences de la communication. Les recherches récentes et futures sur l'*argumentation visuelle* (*visual argumentation*, voir p.ex. : Pollaroli & Rocci, 2015 ; Roque, 2012) permettraient certainement d'enrichir et améliorer les pratiques scolaires traditionnelles.

Chapitre 7

Discussion

Ce chapitre présente une brève évaluation des choix effectués au début de cette recherche (section 7.1), en particulier le choix d'une perspective transdisiplinaire se donnant pour but l'étude de situations de malentendu pour rendre compte, au moins partiellement, des difficultés d'apprentissage de la physique reconnues par la littérature. Ces choix ont-ils permis d'atteindre l'objectif fixé ?

Les sections suivantes permettent de mettre en évidence quelques conséquences des résultats de cette recherche, en vue d'une prise en considération des phénomènes étudiés, autour du "malentendu", dans la théorisation de l'apprentissage (section 7.2), et dans la psychologie en général (section 7.3). À ce sujet, je proposerai l'idée d'une *psychologie des points de vue*, dans le but de contribuer à résoudre d'anciens défis de la psychologie qui ont conduit de nombreux auteurs, au cours du siècle dernier, à considérer la discipline "en crise".

La dernière section du chapitre (section 7.4) est consacrée aux questions restées sans réponse, et esquisse quelques pistes prometteuses pour les futures recherches.

Sommaire

7.1 Le pari d'une perspective transdisciplinaire . . . 675
7.1.1 Expliquer le phénomène des *conceptions* par les situations de malentendu . . . 676
7.1.2 Identifier et décrire des divergences passées inaperçues aux interlocuteurs . . . 681
7.1.3 La question des conditions d'émergence des situations de malentendu . . . 683
7.2 Incidences sur la théorisation de l'apprentissage en milieu scolaire . . . 687
7.3 Incidences des choix épistémologiques : vers une psychologie des points de vue . . . 693
7.4 Les questions qui demeurent . . . 701
7.4.1 Argumentation et *inquiry learning* . . . 701
7.4.2 Les notions intermédiaires . . . 703
7.4.3 Vers une sémiologie du milieu scolaire . . . 704
7.4.4 Concernant le phénomène de malentendu... . . . 705

7.1 Le pari d'une perspective transdisciplinaire

Une nouvelle perspective sur l'apprentissage permet de s'interroger avec un nouveau regard sur la question de la difficulté de l'apprentissage des sciences, plus particulièrement de la physique, et de l'apprentissage conceptuel. La focalisation de la recherche sur les situations de malentendu résulte une remise en question de la notion d'erreur, et en particulier de l'attribution de telles erreurs aux conceptions des élèves. Ce qui est traditionnellement considéré comme une difficulté des élèves à apprendre les sciences, revient dans cette approche à des processus de construction de sens impliquant des processus de communication, sociaux et culturels particulièrement complexes. J'ai abordé cette complexité par une description du système dynamique des relations entre les points de vue de l'enseignant, des élèves et du chercheur à des moments précis où se nouent des *situations de malentendu* pouvant conduire l'enseignant à juger les réponses des élèves "erronées", moments identifiables malgré que ces points de vue et les relations qu'ils entretiennent sont potentiellement constamment en transformation.

Dans certains cas, ces *situations de malentendu* se dénouent et deviennent des occasions d'échanges entre les interlocuteurs, leur permettant de construire une plus grande intercompréhension. Ces *situations de malentendu* participent alors au processus d'enseignement, du point de vue de l'enseignant, et au processus d'apprentissage, du point de vue de l'élève. Mais ce n'est pas toujours le cas, et certaines situations cristallise des divergences entre enseignant et élèves - ou entre élèves - qui ressemblent à ce qui est habituellement considéré comme des difficultés d'apprentissage dans la littérature, ou comme des conceptions erronées des élèves. Dans ces cas-là, c'est l'enquête et la description à un haut niveau de détail qui m'a permis de mettre en évidence quelques enjeux des processus socio-cognitifs que doivent réussir les élèves pour apprendre la physique.

Au chapitre 3 (page 116), nous avions soulevé des questions relatives à la mise en place d'une approche transdisciplinaire pour étudier les processus d'apprentissage à travers les *situations de malentendu*. Je rappelle ces question ci-dessous :

Question I : La dimension cognitive du phénomène de malentendu se réduit-elle toujours à des habiletés individuelles, ou peut-elle s'expliquer, selon les cas, par des processus sociaux (ou autres) ?

Question II : Une approche interdisciplinaire permet-elle l'identification et l'analyse de malentendus passant inaperçus à tous les interlocuteurs engagés dans la communication étudiée ?

Question III : Y a-t-il des conditions dans lesquelles la communication conduit un interlocuteur dans une situation de malentendu alors qu'elle réussit dans d'autres conditions pour le même individu ?

Ces trois questions ont été ensuite élaborées de manière plus précises à la section 3.4 (p. 221), dans une énonciation du *pari intellectuel* effectué par cette recherche que je reproduis ci-dessous par rappel :

$1^{ère}$ *hypothèse* : *la cohérence et la stabilité du phénomène des conceptions s'explique à l'échelon de la situation, au sens où le chercheur peut en décrire la genèse relativement aux processus de communication, aux contraintes de la tâche et en particulier de la consigne, de telle sorte qu'attribuer des conceptions aux individus devienne superflu.*

$2^{ème}$ *hypothèse* : *le choix des échelons et des approches de l'apprentissage pour constituer la perspective de cette recherche permet d'identifier et de décrire des situations de malentendu, en construisant un point de vue de chercheur qui rétablit la cohérence des points de vue des interlocuteurs dont les traces sont analysées, c'est-à-dire sans devoir se reposer sur les traces d'un processus de réparation des malentendus par les interlocuteurs concernés.*

$3^{ème}$ *hypothèse* : *la focalisation sur les situations de malentendu d'une perspective transdisciplinaire qui coordonnent plusieurs approches des processus d'apprentissage permet un nouvel éclairage quant à l'apprentissage des élèves en milieu scolaire, qui met en évidence le déroulement des processus, des enjeux et permet de rendre intelligible les difficultés que les élèves rencontrent dans leurs activités de didactique des sciences.*

Dans les sections suivantes, je reprends ces trois questions et les hypothèses qui y sont afférentes, dans l'ordre indiqué.

7.1.1 Expliquer le phénomène des *conceptions* par les situations de malentendu

Les *situations de malentendu* décrite au chapitre 6 comprennent plusieurs difficultés des élèves à apprendre ou comprendre la mécanique newtonienne, qui sont semblables à celles décrites comme des *représentations initiales erronées* (Courtillot & Ruffenach, 2006), ou comme des *obstacles à l'apprentissage* de la physique dus au fonctionnement naturel de la pensée des élèves (Lemeignan & Weil-Barais, 1993 ; Viennot, 1996). Sans nier la possibilité de biais ou de conceptions individuelles des élèves antérieures à l'enseignement, cette recherche permet de montrer qu'il est nécessaire de s'intéresser *d'abord* et *dans le détail* aux interactions sociales, aux processus de communication et aux particularités sémiotiques du matériel d'enseignement et du discours de l'enseignant, avant de pouvoir attribuer les réponses des élèves à leurs représentations mentales. En effet, les analyses de *situations de malentendu* mettent en évidence la reprises par les élèves du discours enseignant, des consignes des tâches qui leur sont transmises. Autrement dit, la recherche montre l'engagement des élèves dans un processus d'imitation des discours et des manières de travailler de l'enseignant qui est impliqué dans l'apparition des réponses inattendues habituellement attribués aux conceptions des élèves : ces réponses semblent résulter davantage d'une assimilation déformante de l'instruction de l'enseignant que de conceptions du monde physique que les élèves amènent en classe.

A cette réflexion générale, il faut en ajouter une plus précise, sur ce que cette recherche amène à la théorisation des processus d'apprentissage. Que les difficultés des élèves à apprendre la mécanique newtonienne s'expliquent [582] par des *situations de malentendu* plutôt que par les conceptions des élèves

582. Le terme *expliquer* mérite sans doute quelque commentaire, voire une définition. Pour Apostel et al. (1970)c'est ce qui paraît étrange, ou contredit nos attentes, qui est généralement considéré comme nécessitant une *explication*. Selon cette

antérieures à l'enseignement, en quoi cela nous avance-t-il ? Autrement dit, il s'agit à présent de discuter de la source de ces "difficultés d'apprentissage" et de spécifier le nouvel *éclairage* que permet cette recherche.

Dans la littérature, les explications des difficultés des élèves attribuées à leurs conceptions se rangent en trois grandes catégories :

— les interférences entre les connaissances des élèves antérieures à l'enseignement et les savoirs enseignées, par exemple entre la notion de "force", telle qu'elle est vécue par proprioception, et le concept de *force* ;

— la confusion entre des concepts distincts, comme le *poids* et la *masse* ;

— les conditions d'application des concepts ou des formules mathématiques ne sont pas respectées.

L'une des premières explications des préconceptions se réfère aux interférences entre les *connaissances* des élèves construites dans leur vie quotidienne, et les *savoirs enseignés*. Par exemple, pour un élève un ballon de foot peut effectuer une trajectoire courbe après avoir été percuté par le pied (la question posée à la situation-problème #5 du pré-questionnaire), parce qu'il a observé une telle trajectoire à la télévision. Un autre exemple consiste pour un élève à attribuer plus de "force" aux objets lourds, en se basant sur son expérience quand il soulève des objets lourds ou massifs : il est indubitablement plus difficile de retenir une pierre qui tombe qu'un coussin rempli de plumes.

Sur ce point, cette recherche ne me conduit pas à considérer que les élèves ont des conceptions fausses lorsqu'ils répondent ainsi aux questions posées. Au contraire, il me semble que toutes ces intuitions du quotidien sont *vraies*[583], aussi relativement aux *savoirs enseignés*. L'analyse de la situation de malentendu "g comme gravité" est particulièrement parlante sur ce point (voir le commentaire, section 6.3.6.1, p. 442), puisque l'on peut considérer que la boule de pétanque touche le sol avant la balle de tennis si l'on prend en compte un haut niveau de précision dans la modélisation. Cependant, il manque aux élèves - et à l'enseignant ! - les moyens d'une communication efficace. Ce qui conduit l'enseignant à juger que les réponses des élèves sont fausses, voire à leur attribuer des conceptions erronées en physique, c'est (1) d'une part l'échec de la construction communicative et intersubjective d'une intercompréhension entre l'enseignant et les élèves, notamment à travers l'usage d'un *langage commun* (et non seulement d'une

approche de l'explication scientifique, *expliquer un phénomène* revient à en fournir une description permettant au destinataire de recouvrer le sentiment qu'on lui présente des banalités, de telle sorte qu'il peut même avoir l'impression que le sujet d'étude ne valait guère la peine d'une démarche scientifique : c'est que le sentiment initial d'étrangeté à l'origine de la recherche est vite oublié, dès lors que l'explication formulée paraît convaincante. C'est dans ce sens-là que j'ai tenté, dans cette recherche, d'expliquer le phénomène décrit dans la littérature sur les "conceptions" des élèves en sciences de la nature par un processus de communication : une fois le détail de ce processus décrit, il paraît banal, et les réponses des élèves perdent cette étrangeté qui justifiait de leur attribuer des "conceptions" erronées, voire fantaisiste, de la physique.

583. Cette idée peut prendre au moins deux sens différent : au sens où l'expérience d'une personne est *vraie* pour cette personne, le sens que développe Dewey (1938/1993) dans la Logique de l'enquête, c'est pratiquement une évidence. Comment pourrait-il en être autrement ? Les élèves sont tout de même rarement de mauvaise foi. Mais j'ai également des exemples où il est possible de défendre l'idée selon laquelle ces expériences ont une part de "vérité" par rapport aux savoirs en physique, mais à condition que la physique soit utilisée *pour répondre aux questions que les élèves se posent*... ce qui est loin d'être aisé dans la pratique de l'enseignement, celles-ci étant souvent trop complexes pour une approche scolaire où il convient de s'adresser à toute la classe, et pour laquelle le temps à disposition est limité et conditionné à un plan d'études.

langue commune), et (2) d'autre part un processus d'attribution d'une conception à autrui à partir de comportements visibles ou de communication verbale spécifique.

Cependant, pour pouvoir se donner les moyens de considérer à la fois que l'expérience est *vraie* (au sens de Dewey) du point de vue de la personne qui l'a vécue, et que l'intercompréhension échoue, il faut une *psychologie des points de vue*. La reconnaissance du *point de vue* de chaque acteur engagé dans une situation, par exemple de construction de sens, permet d'éviter de considérer l'un ou l'autre point de vue comme *faux* - et dans bien des cas permet d'éviter d'attribuer des conceptions aux individus [584] à partir de leur comportement et de leur discours - et surtout, permet de reconstruire la rationalité de chacune d'entre elle.

En appliquant cette réflexion aux exemples du ballon de foot et de l'objet lourd en chute libre cités ci-dessus, qu'advient-il ? Dans un premier temps, il est indispensable de mener l'enquête permettant de reconstruire les points de vue des uns et des autres. Le *sens* que chaque personne donne à la question posée doit être reconnu [585] - que ce soit dans une analyse de données dans la recherche ou dans la pratique de l'enseignement - pour pouvoir ensuite espérer décrire le processus d'intercompréhension et son éventuel échec. Ce processus permet d'expliquer les exemples ci-dessus par la construction, dans l'interaction entre enseignant et élève, d'opérations partiellement communes et partiellement divergentes. Les élèves qui se basent sur la trajectoire du ballon de foot qu'ils ont vue à la télévision, et ceux qui se réfèrent à leur *notion primitive* de pénibilité à soulever ou retenir une grosse pierre, ne parlent pas de la même chose que l'enseignant. Ce que les uns appelle "force", par exemple une classe-objet {force, force musculaire, effort, ...} ne *désigne* pas le même *objet de discours* que l'enseignant avec {force, $\overrightarrow{F} = \mathrm{m} \cdot \overrightarrow{a}$, ...}. Les deux classes-objet sont *vraies* (pour autant que ce terme ait un sens dans ce contexte) relativement au point de vue considéré, puisqu'elles désignent chacune quelque chose *qui est*. Mais elles ne *convergent* pas dans la coordination des points de vue, au moment du processus d'intercompréhension entre élève et enseignant.

Ces divergences dans la coordination des points de vue n'est évidemment pas seulement une question de "bonne volonté", comme on pourrait vouloir le supposer. En effet, une bonne partie du problème, pour l'acquisition des connaissances par les élèves, consiste à passer d'un *jeu de langue* [586] à un autre, tels que les définit (Grize, 1996, p. 47-48) : de l'usage commun de la *langue* ou des termes proches se rapportent au même sens dans des énoncés synonymes, il s'agit d'acquérir un usage technique de la langue, c'est-à-dire un deuxième type de *jeux de langue* que Grize nomme *langage*, où ces même termes se réfèrent à des concepts précis, par exemple directement transposables dans la formule mathématique nécessaire à la résolution des exercices donnés lors des évaluations écrites. Dans la théorie de la logique naturelle, il est possible d'en fournir une description en montrant que les *classes* de ces *classes-objets* ont été définies

584. Cela devient non seulement inutile, puisqu'il suffit d'étudier le processus collectif de construction d'une compréhension commune, mais également illégitime, puisqu'il y a reconnaissance que la difficulté ne réside pas à l'échelon d'un individu, mais dans les rapports entre les individus. On peut d'ailleurs faire le même raisonnement pour ce qui est de l'attribution des intentions... qui permet si souvent de considérer autrui comme un "con" (pour une *psychologie de la connerie*, voir : Marmion, 2018).

585. Pour un argumentaire d'ordre éthique sur l'importance de la reconnaissance des points de vue dans le champ social, voir Honneth (2005).

586. Grize emprunte ce concept à Wittgenstein (1953, 1958).

différemment. Le problème de l'apprentissage du concept de *force* en mécanique, dès lors, n'est plus de changer de conception individuelle mais d'acquérir un nouveau *langage*, qui permet de converger dans la coordination entre les points de vue. En outre, pour la physique newtonienne, il s'agit d'apprendre à regarder le monde avec *une nouvelle perspective* (Kohler, 2018), celle que l'enseignant propose.

Prenons la deuxième catégorie de problèmes : la confusion entre des concepts différents, ou entre grandeurs physiques. L'une des observations conduisant à ce type d'explication consiste pour les élèves à dessiner une *force de vitesse*, ou *force d'inertie*, c'est-à-dire dans les usages du *dessin des forces* que j'ai documenté, à dessiner une flèche dans la direction et le sens du mouvement. Cette flèche représente peut-être une *force*, pour l'élève, comme le suppose l'explication une confusion entre *accélération* et *force*, ou entre *vitesse* et *force*. Cependant, ce n'est pas sûr. Peut-être que le dessin de cette flèche ne représente pas un concept, pour l'élève. Le chercheur qui considère que l'élève *a* une conception de la *force de vitesse* se trouve tantôt embarrassé de voir que le même élève nomme néanmoins autrement ce même objet dans le discours. La littérature insiste par conséquent sur l'inconsistance de telles "conceptions", jusqu'à proposer un modèle théorie faisant de l'acquisition des connaissances/savoirs une accumulation de "morceaux fragmentés" (le modèle de diSessa, 1993b).

À mon avis, le comportement d'un tel élève ne permet pas de penser qu'il raisonne avec une *force de vitesse* sans mener une enquête plus détaillée sur son cheminement de pensée. Dans cette recherche, j'ai considéré les éventuelles "confusions" par opposition à une différenciation de classes-objets, ce qui permet de constater une éventuelle *indifférenciation des classes-objets* sans pour autant présumer de l'usage conceptuel ou non qu'en fait l'élève. Seul un usage de synonymie - c'est-à-dire l'usage d'un terme pour un autre comme interchangeable - mis en évidence par l'analyse d'une schématisation, me conduit à présumer une telle *indifférenciation* du point de vue d'un ou plusieurs élève. La *situation de malentendu* #2 "g comme gravité" a été analysée comme relevant de la confusion entre g et une *force* pour un certain nombre d'élève : l'usage conceptuel de *force*, dans ce cas, est également documenté par l'enquête. Cette démarche ne nécessite par d'induire l'existence d'une conception chez l'élève : il n'y a pas de différence de fond entre une *indifférenciation* entre des *objets de discours* et un certain état initial dans le processus d'apprentissage. Autrement dit, plutôt que d'y voir une conception erronée, j'y vois l'absence de conception ou de raisonnement suffisamment détaillé de la part de l'élève. L'élève qui ne sait pas utiliser la définition de la *force* par Newton dispose néanmoins d'une classe-objet {force, élan, effort} [587] à partir de la langue vernaculaire, et qui demeure indifférenciée *par rapport* aux classes-objet qu'utilise le physicien : {force}, {inertie}, {quantité de mouvement}, {énergie cinétique}, etc.

Cette *différenciation* qui est nécessaire à l'élève n'est rien d'autre qu'un aspect cognitif du processus d'apprentissage lui-même [588], de telle sorte qu'il devient étrange, une fois le processus d'apprentissage décrit dans le détail, d'attribuer une "conception" à l'élève qui "confondrait" ceci ou cela. En outre, et c'est peut-être là le plus important, ce qui est effectivement indifférencié dans les classes-objet utilisées par l'élève n'est pas forcément ce sur quoi porte la confusion lorsqu'elle est attribuée par le chercheur

587. La classe-objet présentée ici est fictive, et n'a pour seul but de rendre notre explication plus claire.
588. Piaget fournit de nombreux exemples de différenciation progressive dans le développement cognitif.

ou l'enseignant à une conception de l'élève : pour le vérifier, il est indispensable d'étudier l'usage des signes et le *sens* qu'ils prennent pour l'élève en situation. Dans l'exemple de la *situation de malentendu* #2, par exemple, la divergence entre l'enseignant et les élèves concernés n'est pas une confusion entre *force* et *accélération en général*, mais bien plus précisément entre le signe g et la classe-objet {force, force de gravité, même force}. Comme cette divergence entretient de nombreux liens avec la manière dont les savoirs enseignés sont communiqués, que ce soit à l'écrit ou à l'oral, ou même par les usages non-verbaux, ces analyses permettent un éclairage fort différent du problème d'apprentissage que rencontre les élèves que ne le fait l'explication en terme de confusion entre deux concepts, comme si ces concepts existaient indépendamment des personnes.

Il y a encore une catégorie de conceptions qui mérite tout particulièrement notre attention. Des analyses fouillées de l'apprentissage conceptuel ont mis en évidence des cas où les "erreurs" des élèves ne portent pas sur la définition des concepts, mais concernent leurs conditions d'application, assez typiquement lorsqu'il s'agit pour les élèves d'appliquer une des trois lois de Newton : un élève manquera à l'occasion de se saisir de la loi prévue pour cet effet. De telles difficultés se réalisent dans l'action plutôt que dans et par le discours. D'aucuns pourraient penser que les élèves travaillent d'autant plus à partir de leur conceptions individuelles dans ces tâches où il y a peu de mise en discours. Si cette hypothèse se révèle pertinente, la démonstration de l'importance d'une prise en considération de la communication que vise cette recherche ne s'appliquerait pas pour ce problème-ci. Autrement dit, il vaudrait mieux pratique l'enseignement sans trop discourir[589], les situations de malentendu émergeant du fait de cette production langagière.

Que peut-on dire dans cette recherche des situations où il y a peu, voir aucune, verbalisation ? L'analyse de la situation de malentendu #7, portant sur le dessin des flèches par les élèves, permet d'obtenir quelques observations intéressantes sur cette question. Le *dessin des forces* ne fait pas l'objet d'un discours par l'enseignant : il ne devrait donc, selon l'hypothèse ci-dessus, ne pas y avoir de situations de malentendu. Or, les observations effectuées suggèrent que les élèves tentent au moins autant d'imiter les usages de l'enseignant lorsque les moyens discursifs manquent, que lorsqu'ils entendent un discours et procèdent à partir de la reconstruction de la schématisation de l'enseignant pour *apprendre*. En l'occurrence, le manque de verbalisation ou de connaissances prédicatives sur le *dessin des forces* (situation #7), et sur les applications de loi ou de formule (situation #1), conduit les élèves à des divergence d'autant plus éloignés des attentes de l'enseignant.

C'est qu'il s'agit néanmoins d'un processus de communication, quand bien même il ne repose pas - ou moins - sur l'usage d'une langue : les élèves ne disposent alors que de l'observation des dessins de l'enseignant et procèdent néanmoins par imitation, avec d'autant plus de chances d'échouer à converger avec le point de vue de l'enseignant qu'ils ne disposent même pas d'une *langue* pour ajuster leur point de vue, alors que j'ai montré plus haut que la physique nécessitait l'acquisition d'un *langage*[590]. Or, cette

589. C'est fréquemment le raisonnement, implicite ou explicite, qui motive l'approche pédagogique connue dans la littérature sous le nom d'*inquiry learning*.

590. La seule conversation sur le *dessin des forces* que j'ai observée offre précisément l'opportunité à Daniel de s'approprier un critère pour décider si oui ou non il y a une *force* dans la direction et le sens du mouvement : la classe-objet {force qui pousse, force motrice, moteur}.

imitation est bien difficile - elle n'est en fait jamais une imitation exacte [591], comme l'illustrent certaines de nos analyses sur la variation des règles d'usage, des critères de décision, et sur le fait que certaines des procédures que les élèves doivent imiter repose, en dernier recours, sur l'expérience du physicien [592]

Un des résultats, peut-être le plus inattendu, de cette recherche centrée sur une analyse des *situations de malentendu* consiste à montrer une tendance générale qui va à l'encontre de ce que l'on entend souvent dans le milieu scolaire : *les élèves écoutent vraiment ce qu'on leur dit*, ils essaient vraiment d'imiter les pratiques et usage de leur enseignant, à tel point qu'ils nous renseignent sur ce que leur enseignant ou leurs manuels disent effectivement, à leur insu. Cette recherche permet de montrer, à travers la reconstruction du point de vue de chaque élève, que les réponses apparaissant saugrenues au premier regard, ne sont finalement, après analyse, que d'ordinaires tentatives d'imitation de l'enseignant, et quoique parfois créatives et personnelles, elles reconstruisent à leur manière les schématisations de l'enseignant et du système scolaire.

7.1.2 Identifier et décrire des divergences passées inaperçues aux interlocuteurs

Dans la section précédente, j'ai argumenté en faveur d'une explication sociale des difficultés à apprendre la physique, liée à la communication, à la coordination des points de vue et à la sémiotique telles qu'elles se déroulent *en situation*.

La deuxième question relative à notre démarche transdisciplinaire porte sur la faisabilité d'une identification et d'une analyse de situation de malentendu, lorsque cette situation n'est pas identifiée (ou *déterminée* pour reprendre le terme de Dewey) comme telle par les interlocuteurs au moment où ils sont engagés dans la communication étudiée. Autrement dit, cette question pose le problème de la faisabilité d'une approche scientifique - la construction d'un point de vue de chercheur sur ces situations en fonction d'une perspective de recherche spécifiée - du phénomène de malentendu. Il s'agit bien d'un problème, puisqu'il faut bien reconnaître que le chercheur ne fait (que) construire un point de vue supplémentaire sur les points de vue qu'il étudie, ce qui soulève le problème de la légitimité de ce point de vue, tout particulièrement lorsqu'il est censé permettre une reconstruction des points de vue des interlocuteurs dont le chercheur étudie les échanges.

Nous avons vu, au moment de définir le concept de *situation* (voir section 3.4.1, p. 222), que selon la manière dont cette situation est théorisée, il n'est guère possible de concevoir une démarche scientifique qui en fait l'analyse *après coup* et d'un point de vue *extérieur* à la *situation*. Si la situation est définie comme ce que les participants à cette situation conçoivent et perçoivent de leur environnement ou milieu

591. A ce sujet, voir par exemple les premiers travaux sur le conflit socio-cognitif, cités par Carugati, De Paolis, et Mugny 1979, p. 148, qui montrent comment l'apprenant apprend par imitation, même à partir de modèles erronés : "This situation is always, however, subtended by imitation mechanisms since the model used [to teach] is usually a correct model, and in any case superior, from a cognitive point of view, to the modality of resolution which the child is capable of (J. P. Murray, 1974 ; Botvin and F. B. Murray, 1975 ; Cook and F. B. Murray, 1975).".

592. Parler du *champ conceptuel* d'un élève est un abus de langage : le *champ conceptuel* permettant de définir l'applicabilité d'un concept procède d'une analyse des *savoirs* eux-mêmes, ce qui inclut leur construction au cours de l'histoire des sciences, mais sans préjuger de la manière dont un sujet en fait l'acquisition. C'est la science en tant qu'entreprise humaine collective qui permet de caractériser ces savoirs, d'où la grande difficulté pour les élèves de percevoir et de s'approprier ces éléments en milieu scolaire.

à un moment donné, il n'est effectivement guère possible de parler de la situation, d'en faire un objet de discours, sans la transformer et de fait placer le chercheur opérant à partir de son point de vue externe sur un autre objet que celui dont il prétendrait faire l'analyse.

C'est pourquoi j'ai choisi de me reposer sur le concept de Dewey, d'une *situation* d'abord *indéterminée* dont on peut faire un *référent* commun ("objectif") à des points de vue (ceux des participants à la situation sur le moment, celui du chercheur, etc.), avec la précaution que ce référent commun est précisément *indéterminé* - c'est-à-dire qu'on se gardera de le dire *de malentendu* ou de lui donner quoique ce soit comme qualificatif - et que son *dénouement* dépend alors justement de la démarche d'*enquête*, synonyme chez Dewey (1938/1993) de *démarche de recherche scientifique*.

Pour défendre cette possibilité d'une approche scientifique du phénomène de malentendu, il nous a encore fallu un élément. En effet, même avec la définition de *situation* de Dewey, la construction d'une point de vue externe de chercheur pour dénouer la *situation indéterminée* à laquelle il n'a pas participé fait partie des postures scientifiques visées par les critiques du *positivisme* (voir p.ex. : Bruner, 1991a) [593]. Il fallait donc encore trouver une posture non positiviste permettant néanmoins de construire un point de vue scientifique - c'est-à-dire pas tout à fait de même statut que le point de vue de sens commun ou que le point de vue des participants à la recherche - sans tomber dans le *relativisme* où tout point de vue a la même valeur, et où on renonce à la construction d'un point de vue externe qui pourrait prétendre à plus de pertinence - autrement dit à *expliquer* un phénomène - que le point de vue des personnes impliquées. C'est dans l'épistémologie perspectiviste (idem) que j'ai trouvé cet élément permettant de qualifier la différence entre le point de vue du chercheur et celui des participants : le point de vue du chercheur procède de l'usage d'une *perspective*, explicite et construite collectivement par les travaux de recherche et l'argumentation, qui permet de rendre compte de sa construction même. C'est la raison pour laquelle j'ai fait un effort particulier d'explicitation de mes raisonnements et de mes positionnements tout au long de cette recherche : ce n'est pas tant pour convaincre le lecteur que pour *expliciter mes choix*, car dans l'explicitation de cette perspective et dans l'usage rigoureux de sa détermination de mon point de vue se trouve les fondements de la scientificité de la démarche.

Cela dit, le fait d'utiliser une perspective pour construire son point de vue ne garantit en rien que le résultat de l'enquête est meilleur, plus pertinent, que le point de vue du sens commun. Seuls les résultats empiriques peuvent éventuellement nous en convaincre. L'usage d'une perspective, par contre, permet de communiquer son cheminement de pensée de telle sorte qu'il puisse faire l'objet d'un débat ou d'une transmission, et c'est en ce sens que je la considère *scientifique* : elle permet davantage de *réfutabilité* (Popper, 1959/2005) et permet de donner forme à un *savoir*.

593. Si je me réfère dans ce travail aux critiques des sciences cognitives de Bruner et de l'empirisme logique de Piaget, plutôt qu'à d'autres auteurs que j'ai rencontré parmi les nombreuses critiques existantes, c'est que ces auteurs pratiquent néanmoins la construction, rigoureuse et explicite, d'un point de vue vue externe pour leur démarche scientifique ; des critiques plus radicales pourraient "jeter le bébé avec l'eau du bain", et en refusant catégoriquement toute pertinence *ajouté* à un regard externe sur l'expérience vécue des personnes rendre toute *science humaine* impossible.

Plusieurs limites importantes sur la faisabilité d'une démarche scientifique d'étude des situations de malentendu sont néanmoins à signaler : dans le milieu scolaire, orienter vers l'acquisition de connaissances, les prémisses de ma démarche fonctionnent relativement bien. Si cette démarche peut assez facilement être reprise pour d'autres disciplines d'enseignement que la physique, son usage dans d'autres milieux socio-culturels peut se révéler impraticable. Je ne vois pas comment, par exemple, tenir compte des usages malveillants, malhonnêtes ou simplement peu scrupuleux de la communication que l'on rencontre dans des milieux centrés sur la négociation, la vente ou encore la tromperie de ses interlocuteurs. Les moyens techniques de reconstruction des points de vue manquent, me semble-t-il, dès que l'orientation des échanges n'est plus une intercompréhension, et dès que les schématisations utilisées par les interlocuteurs n'opèrent plus pour *montrer* à ses interlocuteurs une *représentation discursive*, p.ex. quand elles viseraient à tromper, à séduire, à forcer la main, etc. Dans ces cas-là, il ne me semble pas pouvoir *déterminer*, par une enquête scientifique, des *situations* en *situations de malentendu*.

7.1.3 La question des conditions d'émergence des situations de malentendu

Dans le contexte scolaire, une troisième question se pose avec acuité : y a-t-il des conditions qui favorisent ou, au contraire, diminue les risques pour les élèves et l'enseignant de se retrouver en situation de malentendu ?

Cette recherche ne permet pas tellement de répondre à cette question, notamment parce que les situations de malentendu décrites procèdent d'une collection et que je n'ai aucun moyen d'évaluer la fréquence de ces *situations de malentendu* relativement aux conditions des activités de didactique des sciences.

Ce que cette recherche permet de montrer, c'est que les apprentissages des élèves dépendent d'une relation qui se construit dans des micro-histoires communicatives, situées et singulières. En ce sens, l'apprentissage est *activité conjointe* et *œuvre commune* et ne peut s'expliquer qu'à un niveau d'analyse collectif permettant l'étude de ce qui, dans le tout d'une co-construction, excède la somme des actions individuelles. Or, il convient de reconnaître que l'apprentissage, ainsi considéré, est un processus relationnel sur lequel aucun individu n'a de contrôle exclusif, à l'instar de toute communication véritable (qui va au-delà de la livraison d'un message ou d'une "information", selon le modèle désormais classique) : "En fait, l'autre n'est pas ce lointain qui surgit de toute sa hauteur, il est partenaire avec moi dans une relation dont il n'a pas plus que moi la maîtrise." (Jacques, 1985, p. 98).

Dès lors, pour minimiser les risques de *situations de malentendu*, il me parait surtout essentiel de développer une conscience de la *relation interlocutive* (Jacques, 1985, p. 98) chez les enseignants, car les difficultés dont nous avons pu fournir quelques illustrations dans cette recherche ne sauraient se résoudre *d'une manière générale*, que ce soit à l'aide d'une approche pédagogique, de gestes professionnels précis ou d'un aménagement didactique : la singularité et l'imprévisibilité de ce que nous avons nommés ici des *situations de malentendu* nécessite un savoir-faire de l'enseignant relatif à la construction d'une relation

interlocutive en situation, avec ses élèves tels qu'ils sont, de manière à favoriser l'activité conjointe, et même l'activité la plus conjointe possible.

Cela dit, cette recherche attire l'attention sur l'importance des choix sémiotiques et communicationnel dans l'aménagement d'un milieu didactique. Une attention particulière aux processus de communication et d'interprétation en relation avec les apprentissages envisagés et effectués en milieu scolaire met en évidence combien ces processus dépendent des spécificité de la situation, et combien chaque détail peut devenir déterminant dans le processus d'apprentissages, de manière diverses selon les élèves, mais aussi selon le matériel pédagogique utilisé, les formes sémiotiques données aux savoirs enseignés, aux consignes, etc. L'habitude actuelle d'une large part de la littérature de psychologie cognitive - et des pratiques enseignantes - qui consiste à attribuer la cause des difficultés d'apprentissage aux représentations ou modes de fonctionnement cognitifs individuels des élèves, relèguent hors de la classe les origines des difficultés, alors que cette recherche met en évidence à l'occasion d'une collection de situations de malentendu combien ces difficultés dépendent plutôt de chaque détail de la situation dans laquelle les élèves travaillent.

Dans son ouvrage de synthèse des difficultés des élèves en classe de physique, Viennot (2011) met l'accent sur les raisonnements des élèves et également sur les défis de la communication dans l'enseignement de la physique, que celle-ci se fasse par le discours mais aussi par les graphiques et schémas. Elle soulève à ce sujet une question qui fait écho dans cette recherche : faut-il plus de rigueur dans l'enseignement de la physique, au risque de la rendre rébarbative, ou une physique plus simple, quitte à prendre le risque d'être assimilé au sens commun, de paraître contre-intuitif et de susciter justement des situations de malentendu ?

Cela ne signifie pas pour autant que dans la classe tout se joue *hic et nunc*. Certains processus d'interprétation et de communication font un usage essentiel d'éléments socioculturels et historiques externes à la classe pour la construction de sens, mais ces éléments ne se réduisent pas aux connaissances antérieures des élèves, pris individuellement : ils comprennent de nombreuses références à des notions partagées dans une société et un milieu culturel donné et, en outre, à une histoire de la constitution même des savoirs à enseigner. C'est ce dernier point qui a motivé l'épilogue de cette recherche, permettant de montrer le lien entre certains difficultés et la manière dont les savoirs de mécanique newtonienne se sont construits au fil de l'histoire des idées.

En somme, les exemples de malentendus permettent de montrer que certaines expressions langagières, par exemple, prennent des significations fort différentes selon les points de vue des différentes personnes en présence. Dès lors, l'hypothèse selon laquelle il n'est souvent pas nécessaire de supposer une conception ou un fonctionnement cognitif *de l'élève*, car la difficulté s'explique en décrivant ces points de vue au moment même de leur construction, me semble globalement corroborée par le résultat des analyses effectuées.

La description des malentendus effectuée au chapitre 6 met en évidence les divergences entre les points de vue tout en montrant la pertinence de chaque point de vue pris singulièrement : la difficulté des élèves ne réside pas, pour ces situations de malentendu, dans d'éventuelles conceptions individuelles que les élèves amènent avec eux à l'école, ni dans leur incapacité à *bien raisonner*, mais dans les processus de

communication entre l'enseignant et ses élève(s) ou entre élèves qui, de part et d'autre, ne parviennent pas à se coordonner dans la construction d'une intercompréhension sur un même objet, qu'il soit objet d'attention, objet de discours ou autre. Dit un peu grossièrement, la difficulté des élèves (et des enseignants pour le coup) est d'abord *sociale*, avant d'être cognitive : ce sont les compétences à communiquer, à se décentrer et à coordonner les points de vue qui manquent et non les compétences logiques ou intellectuelles.

Par contre, sur le plan des savoirs enseignés et de leur rapport complexe aux savoirs à enseigner et aux savoirs savants, les divergences constatées invitent à mieux définir les connaissances escomptées par l'institution scolaire. Même dans le cas des concepts, les "connaissances à apprendre" ne sont pas définies de manière suffisamment détaillée - comme j'ai pu le faire grâce à la logique naturelle - pour permettre à l'enseignant (et éventuellement aux élèves) de prendre conscience des divergences elles-mêmes au cours des processus d'enseignement et d'apprentissage.

7.2 Incidences sur la théorisation de l'apprentissage en milieu scolaire

Étudier les *situations de malentendu* dans une perspective transdisciplinaire intégrant de multiples approches avait pour objectif l'observation des processus d'apprentissage en milieu scolaire, dans les pratiques ordinaires des élèves et de l'enseignant, et l'observation transversale permettant de mieux comprendre comment les divers processus se coordonnent dans la complexité des activités en classe de physique. Qu'avons-nous observé ?

Le choix d'étudier les situations de malentendu permet de se focaliser sur l'activité cognitive des élèves opérant sur le discours. Globalement, sur l'ensemble des analyses, le rôle prépondérant de l'imitation apparaît clairement : les élèves imitent des (portions de) schématisations de l'enseignant, parfois jusqu'à devoir eux-mêmes reconstruire une cohérence aux propos qu'ils tiennent (ce qui apparaît particulièrement bien dans les situations #1, #2 et #7). De manière analogue à l'apprentissage des conduites, l'apprentissage prenant appui sur des discours semble largement reposer sur l'imitation, que ce soit l'imitation du discours oral de l'enseignant ou des nombreuses traces discursives disponibles sur les polycopiés, que ce soit des consignes ou des explications.

L'observation de l'imitation des discours de l'enseignant et des polycopiés à disposition par les élèves est à la fois inattendue et encourageante : dans les établissements scolaires, il est courant d'entendre des enseignants se plaignant que les élèves "n'écoutent pas", "ne retiennent rien" etc. Or, nos observation montrent plutôt le contraire : ils écoutent et imitent les discours au plus proche, mais ils imitent évidemment les savoirs enseignés et non les savoirs à enseigner - bref, l'écart se situe plus souvent, pour les situations de malentendu analysées, entre les intentions de l'enseignant et ce que matérialise effectivement son discours oral ou les discours écrits dans les polycopiés distribués, qu'entre ce que ces discours schématisent et ce que les élèves en reproduisent. C'est une nouvelle inattendue au sens où les élèves retiennent peut-être mieux ce qui leur est *effectivement* dit que ce que les enseignants ont l'habitude de penser, et encourageante parce que le processus d'imitation des discours semble aussi efficace que l'imitation des conduites. Par ailleurs, un potentiel d'amélioration des pratiques se situe plutôt dans le rapport entre *savoirs à enseigner* et *savoirs enseignés*, ce qui est également encourageant puisque c'est entre les mains des professionnels. Cependant, il y a un problème en rapport aux intentions : l'imitation d'un discours n'est pas l'objectif d'apprentissage d'une classe où l'on travaille à la physique newtonienne. Examinons à présent cette question.

Cette observation a une conséquence importante, dont les effets problématiques ont été souvent relevés en sciences de l'éducation : les élèves procèdent en sens inverse, lors de leur apprentissage, à l'enseignant qui enseigne. L'enseignant procède de ses connaissances - notamment conceptuelles pour de nombreux exemples dans cette recherche - pour schématiser un discours d'enseignement, alors que les élèves procèdent de cette schématisation pour acquérir des connaissances, typiquement un concept comme la *force* ou la *masse*. Cependant, en imitant le discours la connaissance acquise est au mieux prédicative, et non conceptuelle : c'est le problème qui consiste à prendre le mot pour la chose, maintes fois souligné par les auteurs des sciences de l'éducation (voir p.ex. Astolfi, 1997 ; Brousseau, 1998/2004).

Cette inversion du sens de la relation entre une schématisation et les connaissances conceptuelles constitue une particularité du processus d'apprentissage par instruction sur des savoirs enseignés qui ne peuvent simplement être désignés - l'objet est une construction théorique abstraite et le référent "invisible" [594] - comme c'est le cas pour la physique newtonienne. Le rapport à l'expérience ou à l'expérimentation est toujours *médié* - jamais immédiat - et notamment par les concepts et autres constructions théoriques que les élèves sont justement tenu de s'approprier simultanément à en faire usage, et que l'enseignant est souvent réduit à communiquer par un discours, par sa schématisation. Or, lorsque les élèves prennent appui sur cette schématisation pour construire des connaissances, ils construisent - au moins dans un premier temps - des connaissances prédicatives et non des connaissances conceptuelles.

Cette inversion du sens du rapport entre *connaissances* et *schématisation* selon le point de vue, c'est-à-dire d'une part *vu de l'enseignant*, et d'autre part *vu des élèves*, est représenté sur le schéma de la communication de Grize augmenté [595] pour l'occasion (voir figure 7.1, ci-dessous), ce schéma permettant justement cette représentation en illustrant le modèle de la *construction* d'une schématisation par un locuteur, que l'interlocuteur doit *reconstruire* pour pouvoir la comprendre et se l'approprier - le modèle de la résonance.

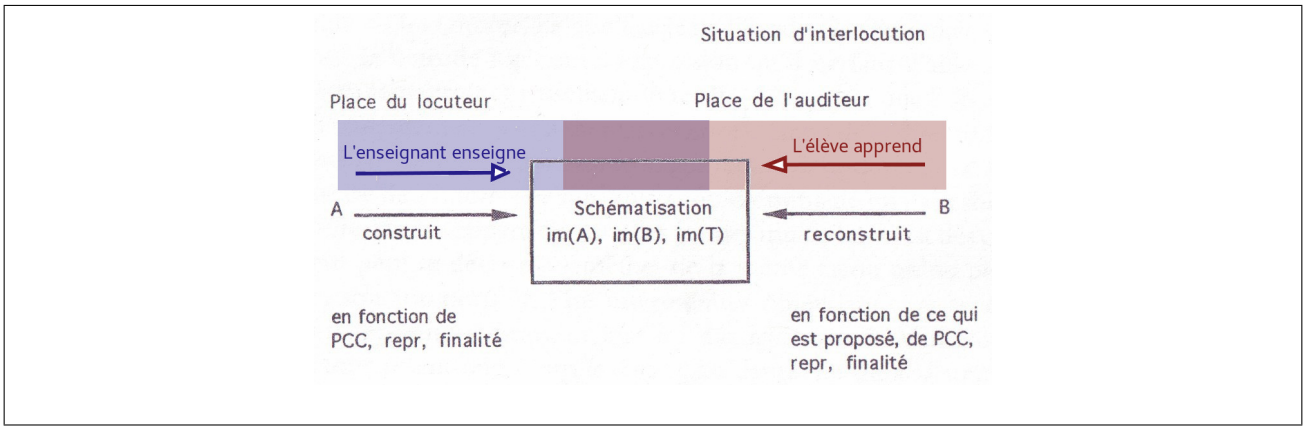


FIGURE 7.1 – Schéma augmenté du modèle de la communication (extrait de Grize, 1996, p. 68).

Si la schématisation n'était qu'un produit présenté aux élèves, leur tâche consistant à en retirer des connaissances conceptuelles par imitation d'une schématisation serait peut-être impossible. Cependant, elle est aussi *processus*, et en *construisant* son discours au vu et au su des élèves dans le vif de l'activité, l'enseignant parcourt une trajectoire de pensée *opérant* sur le discours qui permet aux élèves d'en imiter la trajectoire et non seulement les formules finales, exprimées, le produit. Ce commentaire fournit peut-être un indice pour une explication du fait que les définitions parfaitement bien formulées sont rarement utiles aux élèves pour s'approprier des connaissances conceptuelles : leur forme en produit finalisé et achevé n'est pas propice à une imitation de la trajectoire, de la suite des opérations logico-discursives permettant d'*y arriver*.

594. Nul ne "voit" les forces ni les "masses" en physique, quand bien même ces concepts, une fois maîtrisés, donnent parfois cette impression aux experts, parce qu'ils peuvent "lire" la réalité à travers leur usage de ces concepts.
595. Il ne s'agit nullement de proposer une modification de ce schéma *en général* ici, mais uniquement de mettre l'emphase sur un effet observé du rapport entre les points de vue de l'enseignant et des élèves, que le modèle peut adéquatement représenter.

Selon cette analyse, ce n'est pas tant l'enseignement frontal qui poserait le problème d'un hiatus entre enseigner et apprendre (comme le soutient p.ex. Saint Onge, 1996), que le contenu même des schématisations : pour faciliter l'apprentissage, les schématisations construites lors d'un enseignement frontal doivent permettre aux élèves par la suite d'opérations qu'elles mettent en œuvre - et qu'elles mettent en spectacle - de parcourir une cheminement de pensée qui conduit jusqu'à la création du ou des concept(s) enseigné(s). Le cheminement opéré lors de la schématisation, s'il correspond au cheminement de pensée permettant aux élèves de reconstruire les connaissances, leur permet de reconstruire schématisation et connaissances synchroniquement lorsqu'ils s'engagent activement dans cette reconstruction.

En plus de l'imitation, d'autres processus apparaissent évidemment dans les traces analysées au cours de cette recherche. Les relever tous systématiquement serait trop long pour cette discussion. Je tiens néanmoins à souligner les méta-connaissances dont les élèves font la monstration à l'occasion de la parodie choisie comme incident critique de la situation de malentendu #6 : les élèves donnent alors à voir par cette parodie leur représentation de la physique en tant que discipline - scolaire plutôt que scientifique, peut-être, mais discipline néanmoins - qu'elles ont inférée à partir de l'échange qu'elles ont eu avec l'enseignant à la leçon précédente. La non prise en compte de leur point de vue, qu'elles n'ont pas présenté et que l'enseignant ne leur demande pas, les conduit à suivre une procédure sur leur machine à calculer, selon la solution imposée par l'enseignant, plutôt que de suivre leur propre cheminement de pensée. Leur construction de connaissances conceptuelles, reléguées à l'exercice d'un schème de calcul, induit chez elles une représentation de la physique comme une discipline incompréhensible, déplaisante, et faisant un usage mystificateur de formulations mathématiques peu intelligibles. Si cette représentation de la physique par des élèves est tout sauf une découverte, ce que relève cette recherche c'est l'origine, pour ces deux élèves, de la construction de cette méta-connaissance de la physique : se trouver reléguées à l'exercice de schèmes procéduraux plutôt que de travailler - avec plus d'efforts - à l'acquisition de connaissances conceptuelles, opératoires voire instrumentales conduit ces deux élèves à une perte de sens dans leurs activités scolaires.

Les résultats de cette recherche font écho à des conclusions d'autres auteurs. Par exemple, Garnier, Bernarz, et Ulanovskaya (1991) montrent dans leur recherche sur le concept de *force* que la pratique d'interactions sociales, sans plus de précision, ne suffit pas à favoriser l'apprentissage des élèves : c'est la recherche de précision dans la communication qui distingue les groupes qui progressent par rapport à ceux qui ne progressent pas ou très peu, ces derniers étant par ailleurs souvent les groupes qui privilégient la vitesse d'exécution de la tâche scolaire, au détriment d'une meilleure communication.

Hans Aebli avait déjà signalé cette dépendance des idées à certaines formules verbales dans l'enseignement :

> *On croit construire la connaissance selon un schéma "atomistique" en ajoutant un élément à l'autre, mais on oublie que ce sont justement les rapports mutuels qui définissent et éclairent les différentes notions et opérations.*
>
> *(...)*
>
> *Certaines idées sont alors indissolublement liées à une formule verbale. (...)*

> *Finalement, l'enseignement traditionnel, en isolant artificiellement ce qui devrait être mis en relation, empêche l'enfant de comprendre et l'oblige à recourir à la mémorisation de formules verbales.*
>
> *(Aebli, 1951, p. 12)*

Ce que Aebli critique de l'enseignement traditionnel fait référence à la difficulté de l'interprétation du sens par les acteurs et, par conséquent, au risque de malentendu. Poser le problème des malentendus constitue une manière de revisiter ce qui est attribué par Aebli à une méthode d'enseignement dite "traditionnelle". Il n'est pas impossible que par-delà les travers spécifiques à *l'enseignement traditionnel* critiqué par Aebli se trouve un problème fondamental des échanges humains, que la pratique mise en défaut par Aebli ne fait que révéler, et qui par conséquent peut se retrouver sous diverses formes dans d'autres approches ou styles d'enseignement.

Et si ce problème était celui de l'échelon d'observation choisi, que ce soit par le chercheur pour produire des connaissances, ou par l'enseignant, typiquement pour évaluer ses élèves ou comprendre leurs difficultés ? En considérant une formule verbale comme un *outil sémiotique* permettant à l'enseignant et à l'élève de se comprendre, l'enseignement traditionnel ne tombe peut-être pas si faux. Mais encore faut-il que la situation permette à l'apprenant de reconstruire la schématisation de l'enseignant de manière à lui donner un sens *pas si éloigné* de celui de l'enseignant, sans qu'il soit tout à fait identique. Autrement dit, si la pratique de l'enseignement traditionnel paraît inefficace, c'est peut-être aussi parce qu'au lieu de s'intéresser à l'articulation entre la formule verbale et les structures cognitives, les chercheurs ont défini cet apprentissage en évacuant le langage en tant qu'outil pour l'apprentissage conceptuel, et en tant qu'outil pour la construction interactive d'une compréhension mutuelle. Redonner au langage et à la communication une place constitutive de la cognition dans les recherches en psychologie n'est pas impossible. Mais il ne suffit pas d'ajouter des *opérations logico-discursives* aux *opérations logiques* de Piaget. C'est toute la conception du *sujet* qui change, comme Francis Jacques le souligne dans ce passage :

> *Il faut avoir l'honnêteté de prendre acte du nouvel idéal épistémologique qui inspire la recherche dès la prise en compte de la structure phonologique et syntaxique du discours. Cet idéal s'est annoncé du jour où, avec Ferdinand de Saussure, on s'est mis en tête de comparer l'activité de langage à certains jeux de stratégie comme les échecs.(...)*
>
> *Voici que l'homme ne marche plus comme une machine, ne fonctionne plus comme une organisation auto-régulée : dans certaines conduites il lui arrive d'agir comme un stratège.*
>
> *(Jacques, 1980, pp. 101-102)*

Le sujet devient un agent, et un agent *stratégique*. C'est là sans doute que réside le véritable problème de la pédagogie traditionnelle, comme l'ont depuis montré des auteurs comme Brousseau (1998/2004) et Perrenoud (1994/1995) : l'apprenant est non seulement actif dans sa construction ou reconstruction du sens, mais aussi actif pour ce qu'il ou elle en fait, c'est-à-dire *stratégique*. Dès lors, l'enjeu théorique d'une épistémologie socio-génétique n'est pas seulement de donner une place au langage et à la communication, aux significations et à la construction du sens, dans la genèse cognitive, mais également de disposer d'une

théorie dynamique permettant d'aborder les apprenants comme des *agents*, qui choisissent *eux-mêmes* leur *cheminement de pensées*, ou leurs *trajectoires*[596] au gré des possibles et de leur créativité, voire de créer des possibilités inédites. Nous avons tenté d'y contribuer dans la présente recherche en reconstruisant la diversité des perspectives. Les conséquences de ce passage de l'observation du comportement des individus à l'observation de l'action des personnes impliquées dans une situation qu'elles participent à définir, que je discute ici sur le plan pédagogique, se retrouvent de manière analogue sur le plan épistémologique, dans la pratique de théorisation et de recherche en psychologie. Examinons à présent brièvement les incidences de ce changement de vision pour la psychologie.

596. Au sens socio-culturel déjà mentionné d'une *trajectoire de participation* (voir p.ex. : Lave & Wenger, 1990), ou au sens plus général de Valsiner (2007).

7.3 Incidences des choix épistémologiques : vers une psychologie des points de vue

Les théories en sciences humaines se sont souvent basées sur une épistémologie inspirée des sciences de la nature, et fréquemment mal comprise, en particulier sur l'approche mathématique de Newton [597], alors que le fait d'avoir pour objet d'étude des *agents stratégiques* constitue une particularité qui ne peut être ignorée pour l'étude de phénomènes complexes comme le développement, l'éducation ou l'apprentissage. Dans ces domaines, le point de vue de chacun doit être pris en compte de manière différenciée, comme j'ai tenté de l'argumenter tout au long de cette recherche. Je suis à présent en mesure d'indiquer ce qui me semble constituer une erreur fondamentale de la recherche en psychologie, et d'argumenter en faveur d'une *psychologie des points de vue*.

Dans son imitation des sciences de la nature, *sciences de l'inerte* pour reprendre le mot de Mammen (2018), la psychologie s'est restreinte à l'observation du *comportement* - ou des *conduites* - faisant fi des *points de vue* [598] des personnes participants aux recherches. Et, surtout, la psychologie s'est donnée pour tâche de prédire ces comportements ou conduites. Or, à supposer qu'elle y parviendrait, à quoi bon pourrait servir une science prédisant les faits et gestes des êtres humains ? Une fois la question ainsi posée, il apparaît que les éventuels usages de cette science prédictive risquent, sinon d'être inutiles, de servir les songes totalitaristes les plus sombres. Elle soutiendrait la mise en œuvre de processus d'influence - comme nous le connaissons déjà sur le plan de la publicité [599] et de la propagande - destinés à laisser croire aux êtres humains qu'ils choisissent alors qu'une société "savante" se serait arrangé pour les manipuler au gré de ses "savoirs", les aliénant jusqu'au point de leur faire croire que leur vie ne résulte finalement que de leurs choix [600]. Heureusement, si je puis dire, ce projet "scientifique" est voué à l'échec, car le comportement humain ne se laisse pas prédire [601], du fait qu'il résulte des rapports complexes que la personne perçoit et qu'elle entretient avec la situation dans laquelle - non seulement - elle *agit*, mais aussi qu'*elle contribue elle-même à créer*, ne serait-ce que par sa manière de l'interpréter [602].

J'en arrive à la conclusion que ce projet scientifique-là ne se pose pas la bonne question : la psychologie n'a pas pour tâche de *prédire* le comportement ou la conduite des individus, mais décrire, rendre

597. Pour un bref aperçu des spécificités de cette perspective, voir l'épilogue, section 8, p. 709 et suivantes. En outre, en physique aussi, le problème des *points de vue* est redoutable... Il suffit pour s'en rendre compte de lire l'entrée de Wikipédia sur la *force d'inertie* : "Une force d'inertie, ou inertielle, ou force fictive, ou pseudo-force est une force apparente qui agit sur les masses lorsqu'elles sont observées à partir d'un référentiel non inertiel, autrement dit depuis un point de vue en mouvement accéléré." (Wikipédia, l'encyclopédie en ligne, consulté le 24 juillet 2018 sur : https ://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Coriolis).

598. Concept utilisé au sens développé dans cette recherche, et qui ne saurait évidemment se limiter à demander aux personnes leur opinion dans un entretien : le point de vue nécessite une reconstruction microgénétique et une enquête, et n'est pas transparent aux personnes concernées.

599. Le système commercial numérique actuel fait déjà un usage sans scrupule de telles influences, fondé sur l'abus de confiance généralisé, l'usage de la théorie de l'engagement et toutes sortes de faux-semblants.

600. Les rapports complexes qu'entretient la norme d'internalité avec les objectifs de l'idéologie (néo-)libéraliste (voir : Dubois, 1994/2009) montre bien comment nos sociétés "développées" s'acheminent vers ce modèle.

601. Malgré les innombrables souffrances qu'engendrent les influences sus-mentionnées, il faut bien reconnaître que toutes ces tentatives de contrôler l'humanité ont tôt ou tard lamentablement échouées, que ce soit les totalitarisme politique ou les empires commerciaux.

602. Le lecteur qui se demande ce que ce discours a à voir avec la présente recherche, trouvera dans cette liberté d'interprétation, que je pense avoir soulignée par mon travail empirique, la source de ma réflexion.

compte (voire *expliquer*) les nombreuses relations ou interactions, diverses et variées, que ces individus - ou *personnes* - construisent avec le milieu où ils agissent, et la manière dont ces relations et interactions contribuent, par rétro-action, à construire leur individualité - ou *personnalité*. Mais pour étudier la complexité de ces rapports, qu'ils soient rapports de signification, d'influence, ou d'autres encore, il faut reconnaître l'irréductible liberté de l'agent humain de choisir [603] sa conduite en fonction de la situation, de son histoire, etc. : ce choix devient dès lors la nouvelle mine d'or [604] fournissant au psychologue les traces pour comprendre et émettre des hypothèses explicatives quant aux rapports entre individu et société, entre milieu et personnalité, etc.

Si le choix lui-même reste à jamais *imprévisible* dans une *psychologie des points de vue*, accepter cette imprévisibilité permet à cette psychologie au moins d'expliquer après coup ce qui a eu lieu, dans les cas où l'enquête est réalisable, ce qui est déjà bien davantage que ce que permet une science psychologique prédictive qui échoue. En effet, le modèle de "l'agent rationnel" qui cherche à maximiser ses gains et minimiser ses coûts, postulé pour prédire le comportement des êtres humains, n'échoue pas seulement à rendre compte du raisonnement quotidien (voir p.ex. la critique de : Gigerenzer, 1997) et des processus complexes comme l'apprentissage [606] : il empêche toute recherche psychologique dans ce domaine en postulant une réponse toute faite et irréfutable au problème de la pensée : celle de l'idéologie dominante du monde économique, qui n'est justement pas la manière de penser des 99% de la population mondiale.

L'épistémologie génétique fournit pourtant les fondements pour cette psychologie des points de vue (Psaltis & Zapiti, 2014 défendent la même idée), du fait que Piaget a su construire un modèle organique du fonctionnement de l'intelligence (Broughton & Freeman, 1982) où le sujet *construit* sa pensée. Ainsi, Jalley écrit :

> *Les conceptions cognitivistes sont pour le moins très divisées, de manière antinomique, sinon même jusqu'à l'incohérence, quant à la prise en compte de l'infrastructure organique dans le ressort de l'organisation mentale. Leur propension à privilégier une certaine approche de la "machinerie mentale" est tout aussi équivoque quant à l'identification du contexte où celle-ci doit fonctionner, selon que le déterminisme en est de type innéiste ou au contraire empiriste, donc soit fermé soit ouvert sur l'action de l'environnement physique et social. Les fonctions complexes du langage, autres que la fonction purement référentielle – soit expressive et communicative, bien que celui-ci soit régulièrement mis en avant, en sont expurgées, au profit d'une conception syntaxique en général pauvre, même à invoquer ce qui s'appelle de nos jours la pragmatique. Il va de soi que l'aspect pré-*

603. Quand j'écris "il faut reconnaître l'irréductible liberté de l'agent humain de choisir", j'entends par là une reconnaissance comme celle des physiciens du principe aléatoire de la dispersion de particules dans l'espace, par exemple. Je fais évidemment écho ici à la proposition de Mammen (2018) d'introduire un *axiome du choix*.

604. Ce langage métaphorique exprime l'idée selon laquelle le fait de choisir, pour un chercheur en psychologie, le choix comme *explanandum* dans une science prédictive des comportements cherchant des "lois générales" empêche au même chercheur de l'utiliser comme *explanans*, et par conséquent l'empêche de comprendre nombre d'autres phénomènes spécifiques aux sciences humaines qui ne pourraient s'expliquer autrement que par ce processus de choix. Vouloir prédire ces choix, c'est s'empêcher de l'étudier [605]. Or, ce choix est tout sauf un choix "libre et éclairé", comme l'impose un peu vite et de manière péremptoire les règles de déontologie du chercheur : le choix des personnes en situation et très souvent le point de chute de nombreuses contraintes, mais aussi le moyen qu'ont les personnes de s'opposer à ces contraintes, d'y résister ou de les contourner, voire de les dépasser, en engageant leur créativité.

606. Malgré un siècle de recherche, il faut bien reconnaître que la recherche dans ce domaine ne permet pas de prédire l'apprentissage des élèves de manière à pouvoir en augmenter l'efficience.

cédent est en rapport avec l'élimination délibérée de toute composante affective de la vie mentale. ces modèles échouent complètement aussi à produire une représentation clairement articulée de la continuité-discontinuité des paliers de l'organisation psychique. Et enfin l'imputation d'idéalisme intellectualiste, si traditionnels que soient de tels termes, ne leur convient pas moins, en raison de leur caractère aussi abstrait que limitatif, à préjugé soit biologisant soit logiciste.

(Jalley, 2006, p. 108)

Ces quelques réflexions me font penser que la psychologie cognitive a surtout repris de Piaget les objets d'études (causalité, tâches, etc.) et des éléments de détails comme l'âge d'apparition des conduites, mais a délaissé la grande idée de son épistémologie, qui oblige à des modèles de développement dynamiques, la partie pourtant la plus intéressante. Ainsi, Lautrey et Vergnaud (1997) examinant l'actualité de la théorie de Piaget - il y a déjà plus de 20 ans - remarquent que :

En conclusion de cette introduction, deux constatations... La première est que certains aspects importants de sa théorie ne semblent retenus par aucun des auteurs. Il en va ainsi de sa formalisation des structures cognitives, de sa formalisation du processus d'équilibration, de l'hypothèse de généralité des structures et des stades, de la centration assez exclusive sur la pensée logique et les opérations.

(Lautrey & Vergnaud, 1997, p. 8)

En écho à cette remarque importante, je reproduis ci-dessous une citation de la leçon inaugurale de Piaget, où apparaît clairement sa prise de distance avec la rationalisme kantien et son adhésion à un modèle biologique fondé sur l'analyse historique, dans lequel l'analyse microgénétique en psychologie peut jouer un rôle important :

Après des siècles d'affirmations dogmatiques, Kant, à la suite de Descartes, a été conduit à intervertir l'ordre des valeurs philosophiques et à chercher quelles étaient les conditions de la connaissance elle-même. Selon Kant, nous connaissons les choses à travers seulement les formes et les schémas que notre esprit leur impose. Le vrai problème est ainsi celui de la structure de l'esprit humain et des rapports de cette structure avec les données de l'expérience. La méthode que Kant a inaugurée dans cette étude est une méthode d'analyse directe, fondée sur la conscience de la nécessité. Recherchons, dans le travail de l'esprit, par exemple dans la pensée des savants, ce qui s'impose invinciblement à toute intelligence saine. Nous trouvons un certain nombre de principes, de notions ou de schèmes dont il est impossible de ne pas faire usage. Telles sont les lois formelles de la logique. Telles sont les notions de temps et d'espace. Telles sont les idées de cause, de quantité, de classification. Ces notions, auxquelles l'esprit ne peut pas échapper, sont précisément, d'après Kant, ce que la pensée possède en propre et ce qu'elle impose à l'expérience. Au contraire, ce que le savant constate sans nécessité, ce qui est simplement donné dans les faits, mais donné sans raison intrinsèque, est le produit de l'expérience. Tel est le principe de la méthode qui permet de discerner la part de l'esprit, et la part des faits eux mêmes dans le travail de la connaissance.

Cette méthode d'analyse paraissait à Kant la méthode philosophique définitive, et les philosophes auraient été bien heureux s'il avait pu en être ainsi. Elle assurait à l'esprit une part royale dans la

législation du monde. Simple en son principe, elle opposait nettement la recherche philosophique à la recherche scientifique tout en soulignant leurs rapports. Elle donnait au philosophe un instrument souple et puissant en même temps que sui generis.

Mais les difficultés ont surgi. Ne parlons pas, ici, des continuateurs directs du kantisme, qui ont tout fait pour échapper au point de vue critique auquel Kant les avait invités. Disons simplement pourquoi les chercheurs contemporains les plus épris de l'esprit même du kantisme n'ont pu conserver sans autre la méthode kantienne et en sont venus, très naturellement, à la méthode historico-critique.

Les difficultés sont sorties des faits eux-mêmes. La philosophie de Kant s'appuyait essentiellement sur la science newtonienne, et les jugements ou liaisons que Kant considérait comme nécessaires au fonctionnement de l'esprit étaient essentiellement les principes de la science de son temps. Or l'histoire de la pensée scientifique a montré, depuis Kant, que la distinction entre le nécessaire et le simple donné, ou même entre le nécessaire et le conventionnel, était infiniment plus difficile à établir que Kant ne l'avait supposé. L'exemple le plus célèbre à cet égard est celui des géométries non-euclidiennes. Pour Kant l'espace – et en fait l'espace euclidien, le seul connu de son temps – était une forme a priori de la sensibilité, c'est-à-dire une forme imposée telle quelle à notre esprit, et imposée par notre esprit aux choses. Or l'évolution de la géométrie au XIXe siècle a montré que l'espace euclidien était simplement l'une des formes possibles de l'espace, parmi bien d'autres. L'espace euclidien a perdu ainsi le caractère de nécessité que lui conférait Kant, et le problème devient, dès lors, extrêmement complexe, de dégager ce qui, dans la notion d'espace, provient de l'activité de l'esprit et ce qui dérive de l'expérience extérieure. On sait combien Poincaré a étudié ce problème, sans trouver de solution qui le satisfît définitivement.

Ce que nous venons de rappeler de l'espace pourrait être dit de tous les a priori kantiens. Il n'est pas de principe, de notion ou de schéma qui n'ait évolué depuis Kant. Même la logique, ou surtout la logique, que Kant croyait achevée depuis Aristote et, de ce fait, immuable, a donné lieu à toutes sortes de difficultés d'interprétation, comme le montrent entre autres les discussions actuelles des mathématiciens sur la portée du principe du tiers exclus.

En bref, l'histoire même des notions a montré, depuis Kant, que le critérium de l'activité de l'esprit dans la connaissance n'est pas sans autre la conscience de la nécessité, car ce qui paraît nécessaire à un moment de l'histoire ne le paraît plus toujours dans la suite. Ou du moins, l'histoire a montré que les catégories de l'esprit ne sont pas fixes ou immuables, et les penseurs contemporains sont si pénétrés de cette idée que, par un curieux renversement des valeurs, c'est même la mobilité qui semble être, aux yeux de M. Brunschvicg, par exemple, le critérium d'un travail propre de l'intelligence.

Il n'est pas de notre propos de chercher ici à choisir entre le transformisme et le fixisme dans la théorie de la connaissance. Essayons simplement de dégager, au point de vue de la méthode, ce que comportent ces enseignements de l'histoire. A cet égard, tous les auteurs contemporains, qu'ils soient fixistes ou partisans d'un transformisme des catégories, répondent de la même manière, depuis Cournot en France, Mach en Autriche, et surtout depuis les travaux admirables de Duhem, de Poincaré, de P. Tannery, de G. Milhaud, de M. Brunschvicg, de P. Boutroux : c'est que l'histoire des sciences est seule apte à résoudre les problèmes de la théorie de la connaissance.

Veut-on, par exemple, réinstaurer la position kantienne et chercher, dans l'esprit, ce qui est immuable et nécessaire ? C'est à une patiente étude historique des théories scientifiques que l'on s'adressera pour dégager ce qui, sous la diversité apparente, semble rester invariant au travers des siècles. La critique simple, c'est-à-dire l'analyse directe de la science d'une époque particulière,

cède ainsi le pas devant la méthode historico-critique, seule capable de nous délivrer des illusions du point de vue momentané.

(...)

La psychologie génétique, pour Kant, avait donc pour seule mission de noter l'ordre d'apparition des notions et les circonstances contingentes de leur prise de conscience, mais elle ne pouvait en rien faire œuvre proprement critique, c'est-à-dire faire la part de l'expérience et de la structure de l'esprit dans l'acte de la connaissance. Psychologie et critique de la connaissance étaient donc, pour Kant, sur deux plans distincts et rien ne pouvait les relier.

Au contraire, dès qu'on fait la part de l'histoire dans l'étude critique de la structure de l'esprit, il semble qu'on ouvre la porte toute grande aux explications psychologiques. L'histoire n'est pas en deçà de l'expérience. Elle ne se construit pas a priori. Elle se constitue à partir des données de fait. L'histoire de la race se prolonge donc nécessairement en une histoire des individus, et cette histoire plus intime constitue la psychologie. Si donc les notions se construisent an cours de l'histoire au lieu d'être préformées sur un plan a priori il est du ressort du psychologue de pénétrer dans la nature même des notions rationnelles. Nous voyons ainsi que, grâce à son évolution historique elle-même, la théorie de la connaissance semble en venir aujourd'hui à se placer sur un terrain psychologique. Ne cherchons pas à montrer a priori que la psychologie est en état de répondre à cet appel. Essayons plutôt de prouver maintenant, par quelques exemples précis, qu'il existe des points de jonction possibles entre la recherche historico-critique et la recherche psycho-génétique.

(...)

La méthode génétique semble donc nous donner dans ce cas le critérium permettant de délimiter la part du facteur social et la part des facteurs individuels dans l'histoire de la pensée. On voit d'emblée l'importance de cette détermination pour la critique de la connaissance.

(...)

La seconde méprise consisterait à croire que toute théorie psychologique de la connaissance doit être nécessairement hypercritique, c'est-à-dire pragmatiste. Les psychologues américains ont, il est vrai, essayé de ramener la science à une sorte de jeu supérieur, conditionné par l'action seule. Mais là n'est pas fatalement l'aboutissement de la psychologie. Une telle théorie de la connaissance s'inspire d'une certaine psychologie, mais cette psychologie peut être dépassée. Elle ne se préoccupe pas, en effet, de savoir pourquoi la réussite de l'action nous satisfait. Elle néglige de préciser les rapports profonds qui unissent l'action à la raison. Elle n'analyse pas suffisamment les conditions de la cohérence intellectuelle. L'explication que Dewey ou W. James donnent de l'activité scientifique passe ainsi un peu rapidement sur le problème que posent l'existence des mathématiques et leur accord avec l'expérience physique.

Le recours à la psychologie n'implique donc ni l'empirisme de Locke, ni le pragmatisme de James. Est-ce à dire qu'il conduise à un rationalisme nécessairement univoque et simple à définir ? Ce serait là une troisième méprise. De même que l'analyse historico-critique n'est qu'une méthode, et une méthode ne préjugeant pas des résultats qu'elle permet d'obtenir, l'analyse génétique, en psychologie, est une méthode impartiale. Il est possible qu'elle conduise, en fin de compte, à un retour à Kant, au cas où l'examen du développement mental montrerait l'existence d'un résidu irréductible, parmi les catégories rationnelles, résidu susceptible de réhabiliter la notion d'a priori. Il est possible aussi que cette méthode conduise à l'idée d'un développement spirituel radicalement contingent, semblable à celui que M. Brunschvicg croit apercevoir dans l'histoire de la pensée humaine. Il est possible, en. outre, qu'une telle méthode impose la notion d'une sorte d'idéal directeur de la raison, idéal à la fois actif et non réalisé. Bref, et c'est la seule chose que nous voulions affir-

> *mer ici, la méthode psychologique n'est qu'une méthode. Nous pouvons ajouter que c'est une bonne méthode, puisque son emploi ne préjuge pas de ses résultats.*
>
> *(extraits choisis de : Piaget, 1925, pp.195-210)*

Ce long passage met en évidence le projet intellectuel de l'épistémologie génétique, et combien la modeste contribution de cette recherche, proposant une *psychologie des points de vue*, s'en inspire. Piaget souligne également le problème de l'adaptation des chercheurs aux grands changements épistémologiques des sciences de la nature : la plupart n'ont pas su s'adapter à cette découverte que l'espace euclidien n'en est qu'un parmi d'autres. Si le texte est de 1925, la théorisation en sciences humaines n'a guère fait de progrès sur ce plan, à quelques exceptions près qui insistent justement sur cette critique. L'épilogue (section 8, p. 709 et suivantes) permet de montrer quelques spécificités de la perspective de Newton, que la psychologie tente encore aujourd'hui malheureusement de reprendre à son compte pour étudier l'être humain.

Si l'épistémologie génétique de Piaget fournit les fondements d'une psychologie concrète des points de vue, elle peut être complétée de théorisations pour les domaines qui n'ont pas retenu son attention, comme le social et le culturel, en particulier à travers l'étude de la communication et de la sémiologie, comme j'ai tenté de le montrer dans cette recherche, pour parvenir à mieux rendre compte de phénomènes complexes comme l'apprentissage en milieu scolaire et proposer une science historique de situations singulières.

Mais il y a plus : pour articuler les approches théoriques il faut une logique qui permettent de montrer leur complémentarité. Jacques traite de cette question dans le passage reproduit ci-dessous :

> *Il n'y a donc pas davantage à opter pour une sémantique de l'action ou pour une sémantique du comportement que pour une explication téléologique ou une explication causale. Ce sont là de fausses alternatives. S'il y a plusieurs types de modèles, contigus, compatibles, sans doute complémentaires, il y a place pour divers niveaux correspondants d'explication. Seulement l'épistémologue peut souhaiter faire mieux que de dépasser l'antithétique du motif et de la cause, il peut souhaiter chercher à extirper l'illusion déterministe elle-même, qui affirme la suffisance et l'unicité de l'explication causale. Pour cela il faudrait : 1° fonder la contiguïté même des approches explicatives. 2° ruiner au plan philosophique la prétention des modèles "mécanistes" à réduire l'action humaine.*
>
> *(Jacques, 1980, p. 104)*

Pour contribuer à ce fondement de la contiguïté des approches, j'ai proposé une description explicite des échelons d'observation sur lesquels cette recherche se focalise et, surtout, j'ai choisi ces échelons comme le physicien choisit de prendre en compte ou de négliger les forces de frottement (tous les échelons ne se valent pas pour tenter d'expliquer un phénomène donné), et surtout pour organiser cette complémentarité j'ai coordonné de nombreuses approches dans une seule perspective, ce que le choix d'une épistémologie perspectiviste m'a permis de faire.

En conséquence, mon objet d'étude, repris de la psychologie cognitive, change : plutôt que de vouloir rendre compte du choix effectué par un individu en faisant appel à des lois générales qui permettraient de l'anticiper, ce choix est reconnu comme l'irréductible liberté de l'organisme vivant, imprévisible du fait qu'il ne répond pas à d'éventuelles lois régulières comme le suppose par exemple le modèle économique de l'agent rationnel cherchant à maximiser ses profits. Si l'on admet que la spécificité du vivant est de pouvoir *choisir* en situation et selon des dimensions multiples et dans une rationalité ancrée dans un certain point de vue [607], un nouveau champ d'investigation s'ouvre à la psychologie cognitive : celui de cette rationalité située et ancrée dans un point de vue et des connaissances partielles, dont le chercheur peut tenter la description, en vue de construire des savoirs scientifiques sur la *diversité* [608] des cheminements de pensée humains en fonction des situations, des points de vue et des objets sur lesquels cette pensée s'exerce.

En procédant à cette enquête-là, j'ai pu montrer qu'apprendre c'est aussi, à l'occasion, *prendre la perspective de...*, et que ces perspectives font elles-mêmes partie des *savoirs à enseigner* (Kohler, 2018). L'explicitation des perspectives permet non seulement d'éviter aux experts - enseignants ou chercheurs - d'assimiler les réponses des élèves à leurs critères et de les juger erronées abusivement, elle permet également de mieux se représenter ce que sont les *savoirs à enseigner* eux-mêmes, en dépassant la dichotomie entre *vrai* et *faux* pour une discussion argumentée au sujet de la perspective enseignée. C'est pour cette raison que je termine ma recherche par un épilogue (voir chapitre 8), qui tente de schématiser les spécificités de la perspective de Newton en physique.

607. Dans cette recherche, l'irréductible liberté résultant de la reconnaissance de la possibilité de ce choix est liberté d'interprétation : l'ayant reconnue, j'ai pu en faire mon objet de recherche et décrire la manière dont, pour certains élèves, les choix qu'ils font échappent au scénario pensé par l'enseignant et les chercheurs.

608. À mon avis, c'est la focalisation sur les régularités *avant* d'avoir décrit la diversité des modes de raisonnement en situation, et sans prendre en compte les multiples directions possibles de ces modes de raisonnement, qui a conduit la psychologie cognitive à une impasse où elle ne peut par exemple ni anticiper les difficultés d'apprentissage des élèves ni les expliquer après coup.

7.4 Les questions qui demeurent

7.4.1 Argumentation et *inquiry learning*

Dans l'ingénierie didactique de la séquence observée, des hypothèses sur le rôle facilitateur des activités d'argumentation et d'*inquiry learning* ont été reprises pour la conception. L'analyse des processus d'apprentissage à travers des situations de malentendu, met en évidence l'importance des échanges et de l'argumentation d'une manière générale, en montrant l'importance de la confrontation des points de vue pour faire émerger les divergences. Par contre, cette démarche n'a pas vraiment permis de montrer que le rôle imaginé dans la conception de la séquence des activités d'*inquiry learning* pour l'apprentissage des élèves se vérifie. L'enseignant fait l'hypothèse que la démarche expérimentale permet de faire le lien entre le monde de l'élève et ce que je nommerais désormais la *perspective scientifique*, c'est-à-dire pour la séquence étudié la *perspective newtonienne*. Cette recherche n'est pas la seule où *l'expérimentation* ou *investigation* (*inquiry*) ne joue pas le rôle escompté dans l'apprentissage des élèves :

> *C'est à la démarche expérimentale que revient ainsi la tâche de jeter des ponts entre le monde dans lequel vit l'enfant et la connaissance scientifique. La solution est intéressante et pertinente mais il reste à savoir ce qui se produit quand l'élève applique ainsi une démarche scientifique à son monde quotidien.*
>
> *(Da Silva, 2004, p. 17)*

Dans notre étude de cas, nous avons vu que le rôle effectivement joué par l'expérimentation des élèves dans leur apprentissage s'est révélé minime, au sens où je n'ai pas trouvé d'exemple dans toutes les traces analysées d'un élève ayant changé de point de vue à la suite d'une activité expérimentale en classe. Je reviendrai sur les problèmes soulevés par l'approche par *inquiry learning* dans l'épilogue à cette recherche, en discutant de la construction historique des savoirs de la physique newtonienne. Si cette approche a permis de montrer que l'élève ne peut pas s'approprier un savoir sans une activité intellectuelle qui lui soit propre, elle ne résout pas pour autant les problèmes posés par l'appropriation de connaissances par les élèves à partir de savoirs constitués au fil des siècles sous une forme au moins partiellement arbitraire et conventionnelle, que les élèves ne retrouvent pas dans leurs observations et expérimentations du monde physique, aussi rigoureuses soit-elles.

Bruner (1973) offre un point de vue intéressant sur l'apprentissage par la découverte, qui contribue peut-être à expliquer ces attentes déçues :

> *Étant donné que la culture est au centre de l'adaptation de l'homme à son environnement et qu'elle lui est aussi utile qu'autrefois les changements de morphologie au cours de son évolution, je ne pense pas que, biologiquement parlant, on puisse demander à chaque être humain de redécouvrir la totalité de sa culture. . . , cela semble impossible. (. . .)*
>
> *(...) Ainsi donc, la culture ne se découvre pas ; elle se transmet ou s'oublie.(. . .)*

> *On ne se trompe pas si l'on prend pour modèle le phénomène d'apprentissage du langage. (. . .) [Les parents] ne laissent pas l'enfant découvrir au hasard mais lui fournissent plutôt des modèles qui sont toujours près de lui. (. . .)*
>
> *(...) Une chose est certaine cependant : dans l'apprentissage, une condition est nécessaire qui ressemble à la découverte, c'est la possibilité et l'occasion d'explorer les situations. (. . .)*
>
> *(...) Nous parlons d'apprentissage chez l'enfant, de programmation de l'environnement afin qu'il puisse apprendre ; mais je désire poser la question suivante : comment enseigne-t-on quelque-chose à un enfant, comment arrange-t-on l'environnement d'un enfant, si vous voulez, afin qu'il puisse apprendre quelque chose avec assurance et utilise convenablement dans des situations très diverses les notions qu'il a apprises ? La question de l'apprentissage par la découverte est de savoir s'il peut assurer qu'un enfant utilisera efficacement ce qu'il aura appris. Nous savons bien qu'il y a les bonnes techniques de répétition, grâce auxquelles on peut charger l'enfant d'une foule de connaissances qui sont sans intérêt si l'enfant les utilise dans une seule situation et peut-être mal.*
>
> *(Bruner, 1973, pp. 92-94)*

Pour Bruner, ce n'est pas tant l'expérience qui doit être au centre d'un tel apprentissage constructiviste, mais plutôt le "contraste" :

> *Au lieu des expériences, recourez aux contrastes, utilisez différentes formes de présentation, employez toutes les méthodes formalisées possibles et développez la conscience de soi. (..) Puis vous simplifierez et vous ferez des expériences. Mais d'abord, inventez et observez. Cela me paraît être une méthode pragmatique qui n'est pas dans la grande tradition expérimentale des sciences physiques. Mais la pédagogie expérimentale est-elle dans la grande tradition des sciences physiques à ce point de son histoire ? Elle ressemble peut-être davantage aux sciences économiques qui sont faites de modèles et de pragmatisme.*
>
> *(Bruner, 1973, p. 100)*

Morin fait écho à cette critique, quand il parle de la technologie : "La technologie est devenue ainsi le support épistémologique d'une simplification et d'une manipulation généralisées inconscientes qui se prennent pour la rationalité" (1982/1990, pp. 103-104). La nécessité de la *prise de conscience* par les élèves des manipulations qu'ils effectuent lors des activités expérimentales pour qu'ils puissent les intérioriser comme des connaissances opératoires me semble effectivement une piste intéressante (voir p.ex. : Astolfi, 2002, qui écrit : "Bien des élèves effectuent ainsi consciencieusement les actions didactiques exigées d'eux, à la manière d'un mode opératoire respecté, mais sans que cela suffise à garantir qu'ils accomplissent les opérations mentales correspondantes. Encore moins qu'ils s'engagent et se projettent personnellement dans l'activité conduite."). Si la pratique argumentative peut faciliter cette prise de conscience par les élèves de ce qu'ils font quand ils le font, cette recherche n'apporte pas grand chose sur ce problème de métacognition, qui mérite l'attention des recherches futures.

7.4.2 Les notions intermédiaires

Une seconde question de l'ordre de la métacognition me semble émerger des observations effectuées à l'occasion de cette recherche, et pour laquelle de nouvelles recherches sont nécessaires. J'ai nommé ce problème d'après une idée de Tiberghien (1989b), de postuler l'usage par les élèves de "niveau de lecture" ou notions *intermédiaires* entre les notions de sens commun des élèves et les concepts scientifiques de l'enseignant, qui permettent lors de l'apprentissage de "faire le pont", de procéder cognitivement au passage des unes aux autres. Dans cette idée, également émise par d'autres auteurs (Astolfi, 1997 ; Giordan & de Vecchi, 1990), ce qui fait la force du travail coopératif des élèves et des échanges argumentés entre les propositions des uns et des autres, c'est qu'elles sont plus proches entre elles que ne l'est le discours de l'enseignant. La solution de l'enseignant serait "trop belle" pour que les élèves se l'approprient, c'est-à-dire trop distante de leurs propres représentations du problème.

Cette question passionnante de l'utilité ou non de notions intermédiaires pour permettre aux élèves de parcourir le cheminement de pensée escompté pour s'approprier les concepts scientifiques n'a pas reçu de réponse au cours de cette recherche. Cependant, en examinant dans le détail les reprises déformées du discours de l'enseignant dans les situations de malentendu analysées, j'ai parfois eu l'impression que le discours de l'enseignant était plutôt trop simplifié à l'intention des élèves, la perspective newtonienne trop vulgarisée pour que les élèves puissent se l'approprier. Autrement dit, si le risque de savoirs enseignés inaccessibles aux élèves existe évidemment, l'inverse me semble également exister : des solutions trop simples, comme le fait de négliger les forces de frottement à la situation de malentendu #2 g *comme gravité*, peut conduire les élèves dans des situations de malentendu car les savoirs enseignés sont trop vulgarisés pour permettre de prendre en compte l'expérience des élèves, la reléguant à des "conceptions erronées" dont ils sont censés se débarrasser, alors que la physique newtonnienne est évidemment capable d'expliquer le sentiment de "lourdeur" d'une boule de pétanque relativement au sentiment de légèreté d'une balle de tennis. De même, dans la situation de malentendu #7 *attention, une flèche peut en cacher une autre...*, l'absence d'explications précises et d'exigences sur la pratique même du dessin des forces a peut-être contribué au fait que les élèves produisent des versions fantaisistes, d'une part, et à ce qu'ils ne comprennent finalement pas les enjeux de cet exercice pour leur apprentissage de la physique newtonienne.

Cette recherche invite donc à prêter une attention particulière à ce que l'éventuelle vulgarisation ou simplification des savoirs, dans leur transposition au milieu scolaire, ne les dénature pas au point de rendre le processus d'appropriation des élèves plus difficile et - c'est sans doute le plus dramatique - hors de propos, puisqu'ils ont alors une double peine : non seulement le processus d'apprentissage est rendu plus difficile par le manque de sens de ces savoirs trop simplifiés, mais en plus les élèves travaillent pour acquérir des connaissances qui ne devront, au final, être abandonnées au profit d'une autre, plus complexe et plus complète.

Dans cette réflexion sur les notions intermédiaires, l'apprentissage de l'élève en physique est compris comme une *modélisation*, processus qui a fait l'objet de recherches détaillées (voir p.ex. : Lemeignan & Weil-Barais, 1993 ; Vince & Tiberghien, 2000 ; Weil-Barais & Lemeignan, 1990) et de réflexions théoriques

(Sensevy & Santini, 2006 ; Tiberghien, 1994). C'est une manière de répondre au problème de la transposition, puisque l'activité du physicien - la physique du physicien - et aussi *modélisation*. Ce processus de *modélisation* est lié à l'expérience, quelles que soient les formes pédagogiques données aux activités d'investigations, d'une part, et à la construction par les élèves de "modèles", d'autre part. Le résultat des recherches de Tiberghien sur la modélisation des connaissances des apprenants mettent en évidence des "structures de connaissances" (Tiberghien, 1989b, p. 93), définies comme des "niveaux de lecture [de la réalité] intermédiaires entre des postulats ou raisonnements explicatifs généraux (...) et l'interprétation ou la prédiction cas par cas" (*idem*, p. 96). Les modèles de la physique, selon Thuiller (1988, cité par Tiberghien, 1989b) se situerait dans ces niveaux intermédiaires. Réorienter l'enseignement de la physique dans ce sens nécessite cependant d'inclure dans les savoirs enseignés des savoirs au sujet de la modélisation, qui permettent aux élèves de comprendre leur activité, et en particulier la possibilité de complexifier un modèle ou de le simplifier, *selon les besoins de l'usage*.

Dans les situations de malentendu analysées, j'ai pu illustrer ce point en décrivant des difficultés d'élèves qui prennent leur origine dans la simplification des savoirs enseignés par rapport aux savoirs scientifiques - p.ex. la désignation de g comme constante - et qui prennent leur origine dans la forme des questions et des discours, c'est-à-dire les schématisations des enseignants et manuels, à partir desquels les élèves procèdent pour construire leur connaissance. Ces deux éléments sont imbriqués l'un à l'autre, et c'est ainsi que je suis parvenu à l'idée d'encourager des recherches dans un champ d'investigation permettant d'explorer à la fois la manière dont les savoirs sont transposés au milieu scolaire et les formes sémiotiques qui leur sont données : une *sémiologie scolaire*.

7.4.3 Vers une sémiologie du milieu scolaire

Plutôt que de proposer des modalités d'action aux enseignants, les résultats pour la pratique de cette recherche consistent plutôt à montrer l'intérêt et le potentiel d'une sémiologie du milieu scolaire, que ce soit d'ailleurs pour la physique ou d'autres disciplines d'enseignement. Cette proposition émerge du pari effectué d'une perspective transdisciplinaire, intégrant plusieurs approches pour étudier et faciliter l'apprentissage de savoirs spécifiques en situation et relativement au milieu scolaire. Mes résultats convergent avec les travaux de Lund (2016), dont je n'ai pris connaissance qu'à la fin de cette recherche, qui mettent également en évidence l'importance de l'interdisciplinarité pour étudier l'apprentissage de la physique. La recherche de Lund et Bécu-Robinault (2013) prend en considération cet ensemble sémiotique à disposition des élèves - dénommé "semiotic bundle" - de manière à identifier les moments cruciaux du changement conceptuel des élèves. Bécu-Robinault (2015) propose un cadre théorique et d'analyse "épistémo-sémiotique" pour concevoir et analyser les pratiques d'enseignement de la physique. Cette recherche permet de confirmer la pertinence de cet échelon - dont il reste sans doute encore à affiner la caractérisation précise - pour les futures recherches et pour permettre une pratique d'enseignement qui facilite l'apprentissage des élèves. Bécu-Robinault (2015) allie également des réflexions sur le plan épistémologique à celles sur le plan sémiotique.

Cette interdépendance me conduit à exprimer une idée un peu provocatrice, sur la base de mes observations dans cette recherche, qui interpelle spécifiquement l'interface entre épistémologie - la question de savoir ce que sont les connaissances que les élèves sont censés construire - et psychologie de l'apprentissage - la question de savoir quelles sont les difficultés que ces élèves rencontrent dans leurs processus d'apprentissage : et si les difficultés des élèves à à apprendre la physique de Newton était *fonction des* savoirs enseignés ?

Si l'on enseignait la physique actuelle [609] plutôt que la perspective newtonienne, exigeant des élèves de s'approprier une lecture du monde physique à partir de concepts de physique contemporaine plutôt qu'à partir de concepts de physique classique, il est fort probable que cet enseignement ne conduirait pas les élèves dans les difficultés constatées par les recherches et attribuées aux conceptions des apprenants que nous connaissons désormais. Cette hypothèse revient à dire que ces difficultés ne sont pas des conceptions ou propriétés individuelles relatives à un mode de pensée humain, mais plutôt les conséquences d'une théorisation particulière de la physique. Elle permet également d'envisager le fait - pourtant évident une fois qu'on y pense ! - que les théories enseignées ne sont pas *parfaites* [610], quand bien même nous choisirions les meilleures dont nous disposons, et que les élèves sont particulièrement sensibles à ces imperfections [611].

En mettant sur pied d'égalité élèves et enseignants dans ma perspective de psychologue, je me trouve ainsi conduit à renvoyer - au moins pour une part - les difficultés que rencontrent les élèves dans l'apprentissage qui leur est demandé aux imperfections et défauts des savoirs eux-mêmes, que l'institution tente de leur transmettre. C'est, d'une manière concrète, montrer l'importance de la théorisation, ou même d'une *bonne* théorisation, pour l'efficience de l'enseignement.

7.4.4 Concernant le phénomène de malentendu...

Le concept de situations de malentendu est-il adéquat, ou pose-t-il problème ? Est-ce un échelon d'observation permettant effectivement d'étudier le processus d'apprentissage des élèves en milieu scolaire ?

Je n'ai pas vraiment trouvé de quoi répondre à ces questions, difficiles, et je m'en remets aux éventuelles critiques et débats subséquents à cette recherche pour avancer sur ces questions, en me contentant ici de les soulever. Peut-être les *situations de malentendu* n'ont joué qu'un rôle de prétexte, dans cette recherche, à aborder de nombreux éléments d'une psychologie des points de vue plus générale, dont je manque encore des moyens permettant de les présenter de manière plus différenciée et systématique.

609. J'ai eu l'occasion de consulter une proposition de Bernard Chabloz fondée sur la mécanique quantique.
610. Autrement dit, les sciences procèdent elles-mêmes d'une *polyphonie* (sur ce concept chez Bakhtine, voir p.ex. : Rabatel, 2006)- comme le montrent les travaux dialogiques sur la création de connaissances/savoirs (voir p.ex. : Paavola & Hakkarainen, 2005) - dont la cohérence interne, ou coordination des points de vue, n'est pas sans poser problème ; or, les apprenants sont souvent laissés seuls face à cette tâche de coordination des diverses *voix* qui font "une" science, celle-ci étant supposée homogène, alors que les spécialistes eux-mêmes ne parviennent évidemment pas - *et probablement tant mieux !* - à une pensée "unique".
611. À l'instar du regard de l'enfant sur la société, bien plus pertinent que celui de l'adulte qui a eu le temps de s'habituer à ne pas voir ce qui fait défaut.

Toujours est-il que j'ai trouvé la perspective construite pour cette recherche bien incapable de saisir *le malentendu* dans toute sa richesse, malgré qu'elle ait permis les descriptions présentées au chapitre précédent. Le jour[612] où j'ai ouvert le livre de Jankélévitch (1957) qui traite du *malentendu* - quoique dans une perspective philosophique - j'y ai reconnu une pensée qui prolonge mes modestes conclusions, et va bien au-delà de ce que j'ai pu montré ici. C'est pourquoi j'illustrerai, au terme de cette recherche, ces éventuelles futures pistes pour la recherche empirique par des citations de cet auteur.

J'ai renoncé, au cours de cette recherche, à présenter une typologie des malentendus, qui les analyserait selon leur genre ou leur lieu, ou selon d'autres principes encore. Jankélévitch (1957) évoque la complexité d'une telle démarche et fournit quelques distinctions avec des mots nouveaux pour le dire, et en particulier autour de cette idée du "cumul des idées dans le signe" :

> *"L'inadéquation du signe et du sens, où consiste toute la philologie du malentendu, prend ici deux formes différentes qu'on peut appeler* Paronymie *et* Allégorie. *La paronymie d'abord, et spécialement l'"homonymie" ou Équivoque, car - pour la "synonimie", qui est la pléthore des mots, elle serait plutôt univoque que plurivoque. Au "polytélisme" des cérémonies et des rites répond ici la "polysémie" des mots, c'est-à-dire le cumul des idées dans le signe, un même signe desservant plusieurs idées. Comment ne se méprendrait-on pas à tout instant ?*
>
> *(Jankélévitch, 1957, p. 158)*

Les distinctions, complexes, se poursuivent avec une question que je n'ai que peu abordée dans ma recherche, autour du projet d'identifier et décrire ces *situations de malentendu* qui passent inaperçues aux locuteurs[613], que Jankélévitch nomme "double malentendu" dans l'extrait suivant :

> *Nous n'avons pas séparé jusqu'à présent les deux variétés essentielles de malentendu, celle où la dupe est de bonne foi et celle où la dupe fait plus ou moins exprès de "marcher" ; mais comme chacune de ces variétés - conscience relativement inconsciente et conscience consciente - se subdivise à son tour en deux autres, selon que le partenaire reste volontairement ou non dans l'équivoque, il en résulte les quatre niveaux suivants : 1° Les deux partenaires se mécomprennent mutuellement ; c'est la stérile pseudo-relation ou* double malentendu *au sens restreint, le plus regrettable de tous, car personne peut-être ne saura jamais la vérité. L'auditeur a mal compris alors que son interlocuteur se croit bien compris ; dans la mesure où il ne remarque pas la méprise, ce dernier se méprend donc aussi.*
>
> *(Jankélévitch, 1957, pp. 165-166)*

La dimension ouverte des schématisations que je me suis attelé à décrire, dimension sur laquelle Grize insiste pour la logique naturelle, pose un défi considérable à l'approche scientifique, et tout particulièrement au fait qu'elle permet de se rendre compte de l'inachevé de la pensée humaine. Dans cette recherche, j'ai

612. Je n'ai découvert et lu cet ouvrage qu'à la fin de cette recherche, grâce aux conférences de l'*université populaire* de Caen.

613. Je n'ai pas pu vérifier très précisément dans quelle mesure les locuteurs ne s'en sont pas rendu compte eux-mêmes, au-delà de l'analyses des traces discursives, n'ayant pas mis au point une démarche empirique pour les interroger à ce sujet, par exemple.

pu montrer plusieurs fois que les élèves n'avaient pas pensé à quelque chose plutôt que d'y avoir mal pensé : ce que Jankélévitch décrit ci-dessous comme un esprit qui "dit *et caetera* prématurément" :

> *Chez nos classiques, chez Corneille, Racine, Bossuet, Pascal, le cardinal de Retz, Montesquieu, le je-ne-sais-quoi exprime le premier désarroi du rationaliste scandalisé par les causes dérisoires de l'amour, par la disproportion des causes et des effets, si injurieuse pour la raison, enfin par ces ébranlements infinitésimaux et ces motivations microscopiques qui sont les seules raisons du cœur. Ici l'esprit fort n'a pas pris le temps de dénombrer, débrouiller ou faire apparaître tous les éléments d'une totalité ouverte : désespérant d'en finir, il dit* et caetera *prématurément.*
>
> *(Jankélévitch, 1957, p. 37)*

Pour équilibrer cette mise en évidence de l'impuissance de l'esprit humain à penser le tout, cette "totalité ouverte" qui ne se laisse jamais épuiser par la connaissance, Jankélévitch souligne a contrario la soumission de la forme au sens, dans l'expression, en revenant à une forme de bon sens qui me semble complété tout ce que j'ai pu dire de l'importance des processus de communication et des détails sémiotiques :

> *Pour dire quelque chose, il faut certes savoir le dire, mais il faut avant tout avoir quelque chose à dire, et cette dernière condition est si primordiale, si irremplaçable, si indispensable qu'il suffit à la rigueur d'avoir quelque chose à dire pour réinventer soi-même les moyens de dire ; celui qui éprouve impérieusement le besoin de dire quelque chose peut* a fortiori *le dire, - et tel est justement le propre du génie créateur qui, tout en concevant son "message", improvise une technique, trouve un langage nouveau, fonde une esthétique et une syntaxe, pose, comme Dieu, les normes d'après-demain.*
>
> *(Jankélévitch, 1957, p. 98)*

Jankélévitch met en évidence une autre dimension essentielle de la logique naturelle et qui a fait l'objet de notre attention : la prise en considération du temps dans la perspective construite pour aborder les points de vue. Il n'est sans doute pas trop fort d'affirmer qu'on ne peut comprendre un point de vue sans le replacer dans son histoire, sa genèse au cours du temps : arrivés à la fin de cette recherche, c'est très certainement le parcours accompli - celui de la lecture ou celui de son écriture - qui est générateur d'un éventuel savoir, bien plus que les énoncés recueillis en conclusion.

> *N'y a-t-il pas là une injuste inégalité ? Le fils repenti rentre à la maison (que le fils vertueux n'a jamais quittée) après avoir bouclé la boucle, accompli le circuit de ses frasques, refermé son voyage circulaire autour des péchés. Dans l'espace, les deux fils en sont littéralement au même point. Et pourtant il n'y a pas équivalence entre celui qui est resté et celui qui est parti, puis revenu, qui a péché, regretté et, sinon aboli le fait d'avoir-fait, du moins réparé la chose faite... On peut, recommençant* da capo, *tenir le temps pour nul et non advenu ; mais on ne peut faire que le devenir ne soit pas devenu ! On peut faire* comme si *rien n'était arrivé, on ne peut faire* que *rien ne soit arrivé ! Malheur à ceux qui négligent le temps !*
>
> *(Jankélévitch, 1957, p. 154)*

Enfin, sur une note plus positive, Jankélévitch souligne dans une mise en abîme métaphysique ce que j'ai parfois tenté d'énoncer en référence à Baldwin, Piaget et d'autres auteurs du paradigme organique : donner du sens n'est pas un processus psychologie mécanique, c'est un *acte créateur* :

> *Et puisque comprendre est coïncider avec le mouvement créateur ou organisateur, et non point imiter un démiurge, mais reproduire et revivre pour son propre compte le geste démiurgique comme si c'était la première fois, il faut convenir que l'intellection est une forme gnostique de création, autrement dit un recréation ; comprendre, c'est la façon qu'a la créature de créer lorsque, créatrice et créée à la fois, elle s'affirme comme demi-dieu ou du moins comme demi-génie. Si l'intelligence, recomposant après coup ce qu'elle décomposa, s'entortille dans la complication, l'intellection épouse le mouvement même par lequel la simplicité rayonne en complexité. Si l'intelligence rétrospective commence par la fin, la vive intellection, contemporaine d'une naissance qu'elle capte sur le fait, va dans le même sens que la création et prend ainsi les choses par leur commencement ; l'opération intellective intervertit les procédés intellectuels et remet la pensée à l'endroit.*
>
> *(Jankélévitch, 1957, pp.49-50)*

Dans ce travail scientifique je ne me prononce pas quant à l'origine et la *raison d'être* des *malentendus*, car ni ma méthodologie, ni la sélection des traces analysées ne me le permettent. Je renvoie donc volontiers encore une fois aux intuitions et à l'expérience de Jankélévitch sur cette question, qui est bien plus pertinent que je ne saurais l'être sur un problème philosophique aussi épineux :

> *Il y aurait bien assez d'amour chez les hommes pour faire de cette terre un jardin de félicité... Hélas ! ces amours n'aiment pas ensemble, αμα, et ne sont pas réciproques : aussi le malheur est-il souvent un déréglage des heures heureuses. Le diable est "dans le beffroi" et il a désaccordé toutes les Harmonies de la Théodicée, déréglé toutes les horloges de la Monadologie. Comme dans l'Andromaque de Racine, ou comme dans ce poème de Henri Heine qui est la tragédie des amours non partagés, l'un poursuit l'autre et personne n'est payé en retour.*
>
> *(...)*
>
> *Le malentendu n'est pas simplement l'escroquerie : il institue entre les hommes un certain ordre provisoire qui, s'il ne remplace pas l'entente translucide et sans arrière-pensée, vaut pourtant mieux que la discorde ouverte. Mal rendu nécessaire par la sottise et la méchanceté des hommes, disons qu'il est l'entente discordante ou le désaccord accordé, maintenu vaille que vaille en équilibre jusqu'au jour de la culbute. Le malentendu trame entre les cannibales que nous sommes une espèce de* modus vivendi*, et tout un cérémonial convenu de liaisons imaginaires, de fausses brouilles et de pseudo-réconciliations. Ainsi c'est peu de dire que le malentendu a une fonction sociale, vu qu'il est la sociabilité même ; il bourre l'espace qui est entre les individus avec l'ouate et le duvet des mensonges amortisseurs, il fait du barbare prédateur et anguleux un faussaire civilisé, un tricheur qui a de bonnes manières ; car les fraudeurs ne se supporteraient pas s'ils devaient approfondir leur condition, et la franchises totale, la diaphone loyauté aurait tôt fait de changer leur police en une jungle frénétique.*
>
> *(Jankélévitch, 1957, p. 135 et p. 165)*

Chapitre 8

Épilogue

Comprendre, c'est reconstituer l'*histoire* - le processus historique, la généalogie ou genèse - de ce qui nous en apparaît tout d'abord déconnecté, isolé, comme sorti de nulle part, et du fait de cet isolement interloque et surprend l'esprit vigilant et curieux. Si cette définition fait de toute compréhension (ou même *explication*) une sorte de *narration* (voir à ce sujet : Bruner, 1986/2000, 1991b), c'est le processus même de construction de cette narration qui peut lui donner en héritage quelque qualité scientifique : partir de l'aveu de ne pas disposer d'emblée d'une explication toute faite, mener l'enquête la plus vaste possible, et construire très progressivement le processus historique avec transparence, précaution et conscience de chaque geste.

Je me suis dès lors laissé entraîné, à la suite de cette recherche, jusqu'à la reconstruction de quelques bribes de l'histoire de la physique newtonienne, qui amènent un éclairage supplémentaire aux situations de malentendu décrites au chapitre 6.

Sommaire

8.1 Analyse historico-culturelle de la genèse des significations de mécanique classique 713

8.1.1 Les apports de Newton en mécanique : un changement d'approche 714

8.1.2 La méthode de Newton : entre malentendus et débats 718

8.2 Quelques réflexions sur le lien entre genèse des significations et enseignement 723

8.2.1 Des malentendus au temps de Newton à ceux d'aujourd'hui 723

8.2.2 Des malentendus de Newton à ceux des élèves 726

8.2.3 De la théorisation à l'apprentissage : cheminement à sens inverse 730

8.3 Physique et psychologie : que sont les savoirs de la physique newtonienne ? 733

8.3.1 Le sens classique et traditionnel d'*hypothèse* 733

8.3.2 De la physique newtonienne aux savoirs enseignés 736

8.3.3 De la mécanique classique à la mécanique quantique 741

8.1 Analyse historico-culturelle de la genèse des significations de mécanique classique

L'identification et l'analyse de situations de malentendu a permis, selon les cas, de montrer pourquoi les réponses des élèves sont parfois si difficiles à interpréter et peuvent paraître à la fois correctes et erronées. Ces analyses nous renseignent également sur les origines complexes du sentiment de détresse que peuvent éprouver les élèves, déclarant à l'occasion "je n'y comprends rien" en prenant connaissance d'un jugement considérant leur travail "erroné". Il y a naturellement autre chose qu'une simple assertion de ne pas comprendre la physique derrière cette petite phrase : ce que l'élève bien souvent ne comprend pas, c'est la rationalité même du jugement auquel il est exposé. On ne peut que l'excuser devant la complexité de la tâche... En effet, reconstruire la rationalité de ce jugement nécessite non seulement d'écouter l'enseignant, mais encore une analyse fine des interactions, de l'institution, du système scolaire tout entier et nous conduit même à revisiter l'histoire et la philosophie des sciences, comme je l'ai mentionné à plusieurs reprises au fil des enquêtes.

J'aborde ici la question des savoirs à enseigner avec une perspective *historico-culturelle*, parce que cela permet de s'intéresser à l'étude de la genèse historique des significations au sein d'une culture donnée. J'en donne ici un aperçu à travers les débats ou dialogues qui ont donné naissance à la physique newtonienne. Cette perspective part du principe que les significations (telles qu'elles sont étudiées à leur échelon) gardent quelque chose de leur genèse historique, qui est notamment maintenu à travers la tradition culturelle au niveau de l'usage de la langue [614], et au niveau du lexique dans des liens sémantiques [615] dont l'étymologie permet parfois de retracer l'origine, quoique les liens soient particulièrement complexes au niveau culturel [616]. Ces quelques considérations ont une importance particulière pour une recherche sur les malentendus (au sens large) : il n'est pas impossible qu'une perspective historico-culturelle sur la construction des savoirs permettent de mettre en évidence des malentendus à l'échelon des significations, c'est-à-dire des malentendus dont on trouve des traces dans la genèse historique des significations qui se sont culturellement transmises jusqu'à la salle de classe du $XXI^{ème}$ siècle, de manière transindividuelle. Dans les situations de malentendu identifiées au cours de la recherche, des éléments spécifiques des savoirs à enseigner en physique sont apparus susceptibles d'entretenir ou de faire surgir de tels malentendus. J'espère pouvoir montrer, dans cette brève analyse historico-culturelle, que ces savoirs héritent de malentendus apparus dès leur genèse historique dans les débats des savants pratiquant la philosophie de la Nature. Nous verrons que la notion de *force de gravitation* est au centre des significations ayant suscité des malentendus dès les débats historiques, et jusqu'à aujourd'hui dans la classe de lycée dont cette recherche étudie les discours.

614. Nous verrons des exemples de ceci dans la manière de parler en physique.
615. Par exemple les liens qu'entretient le concept de *force* avec d'autres significations du mot dans la langue vernaculaire.
616. Par exemple, les liens sémantiques qu'entretient un certain terme du lexique avec d'autres dépend souvent non seulement de la langue d'usage mais également de la région où elle est pratiquée. Il y a là indubitablement du *culturel*.

8.1.1 Les apports de Newton en mécanique : un changement d'approche

C'est en réagissant à une lettre de Hooke, que Newton considère comme erronée, mais dont il retient néanmoins l'idée que "l'attraction est toujours inversement proportionnelle au carré de la distance au centre" (Koyré, 1968, p. 21), que Newton propose de comprendre le mouvement des planètes comme "la déflexion d'un mouvement inertiel par une force centrale (attractive)". C'est à partir de là, et bien avant que ne soit établie la valeur de g=9,81 $\frac{m}{s^2}$, que Newton parvient à l'une de ses plus importantes constructions théoriques : il parvient à énoncer une même loi pour prédire le mouvement des planètes [617] et celui des objets en chute libre sur la Terre, ce que personne n'avait mis en relation jusque là : c'est, dans le langage de l'époque, *relier le monde sub-lunaire au monde supra-lunaire*.

Même si l'on enseigne toujours *la formule de Kepler*, c'est bien de Newton que vient l'idée d'une *gravitation générale* :

> *Kepler partage la conviction de Copernic et de Gilbert : les forces gravitiques, appelées ainsi à juste titre, sont propres à chacun des corps célestes ; les planètes ne s'attirent pas les unes les autres ni le Soleil, en ce sens, ne les attire ; il n'y a pas de gravitation universelle. D'autre part (a) il souligne le caractère actif de l'attraction gravitique qu'il interprète comme étant analogue à l'attraction magnétique (il l'appelle quelque-fois "magnétique") et (b) il soutient que cette attraction réciproque par gravité se produit entre la Terre et la Lune à cause de leur ressemblance fondamentale, de sorte que la force d'attraction de la Lune opère aussi loin que la Terre (provoquant ainsi les marées) et que celle de la Terre opère même au-delà de la Lune.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 211)*

Par contre, pour parvenir à réunir monde sub-lunaire et supra-lunaire dans une même théorie de la gravitation, il faut encore penser à traiter la Terre comme un *point matériel* dans le calcul de l'attraction, ce qui constitue également une véritable découverte, indispensable à la réunion de la *physica terrestris* et de la *physica coelestis* :

> *On sait également que ce n'est qu'en 1685 qu'il découvrira la loi selon laquelle une sphère (la Terre) attire un corps placé en dehors d'elle, comme si toute sa masse était concentrée dans son centre, et que c'est alors seulement que, utilisant les mesures de Picard (dimension de la Terre) et de Huygens (valeur de l'accélération gravitationnelle à la surface de la Terre), il pourra procéder à la comparaison précise de l'action respective de la gravitation terrestre et de l'attraction cosmique, et conclure à leur identité.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 22)*

La réduction, dans le modèle théorique de Newton, d'une masse aussi importante que celle de la planète Terre à un *point*, joue donc un rôle très important dans le développement de sa physique. Or, dans l'enseignement de la physique observé lors de cette recherche, cet élément reçoit souvent fort peu d'attention, s'il n'est pas complètement ignoré ou réduit à un point de procédure.

617. Les équations de Kepler sont connues depuis longtemps.

En outre, cette citation montre que la mesure de g ($9,81\frac{m}{s^2}$) permet à Newton de *vérifier* son hypothèse théorique, et non de procéder à une *application* de la loi de la force de gravitation comme le propose l'exercice 1.2 (voir la figure 6.1, p. 384), analysé à l'occasion de la situation de malentendu #1 *La lune est en chute libre...* (section 6.2).

La méthode de Newton consiste en une description fine et mesurée des phénomènes avant d'en chercher les "causes" ou modes de production (*modus produrendi*). Pour mettre en évidence les conséquences de la méthode de Newton dans sa construction d'une théorie, prenons l'exemple de la notion de *mouvement* :

> *Le nouveau concept de mouvement qui s'affirme si victorieusement dans la science classique est un concept très simple : si simple que - bien que d'un emploi très facile quand on en a l'habitude comme nous l'avons tous - il est très difficile à saisir et à comprendre pleinement, même pour nous. Je ne peux l'analyser ici mais j'aurais voulu faire remarquer que, comme nous le dit très clairement Descartes, ce concept substitue une notion purement mathématique à une notion physique : contrairement à la conception pré-galiléenne et pré-cartésienne qui entendait le mouvement comme une espèce de devenir, comme un genre de processus de changement affectant les corps qui lui sont soumis, par opposition au repos qui n'était pas un processus, la conception nouvelle - ou classique - interprète le mouvement comme un genre d'être, c'est-à-dire non comme un processus mais comme un* status*, état tout aussi permanent et indestructible que le repos, et qui, pas plus que ce dernier, n'affecte les corps en mouvement.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 31)*

Dans ce passage, il apparaît clairement que ce qui fait encore les difficultés de compréhension aujourd'hui, était déjà dans le débat de l'époque un point d'opposition à Newton : Descartes tente de faire comprendre à Newton qu'il ne fait plus de la physique mais autre chose. A la limite, cela pourrait être considéré comme un malentendu : Newton n'a pas tellement gagné au jeu compétitif de la meilleure philosophie de la Nature, il en a changé les règles du jeu en changeant son objectif épistémique. Il a réinterprété l'objectif de connaissance en philosophie de la Nature légèrement autrement, ce qui lui permet de réussir là où les autres théoriciens étaient bloqués, mais qui transforme également la nature de la connaissance qui en résulte, comme le montre Koyré.

Une similarité entre les conceptions des apprenants ou novices et le problème relevé ci-dessus au moment de la construction historique des savoirs mérite d'être relevée ici : les élèves pourraient se retrouver dans une situation de malentendu quant à la finalité de la physique, comme certains contemporains de Newton, visant un objectif épistémique soit plus philosophique - expliquer la Nature plutôt que la traduire en langage mathématique - soit plus quotidien ou "pratique" que Newton, à savoir en prenant en compte toutes les particularités des situations singulières. Newton faisait abstraction de nombreux facteurs dans sa modélisation, en visant des lois générales des rapports mathématiques dans le monde physique. Plutôt que de concevoir des représentations des élèves qui seraient des résistances à l'enseignement, cette analyse suggère des situations de malentendu quant à la finalité de la physique, qui sont semblables sinon identiques au moment de la construction des savoirs pour les contemporains de Newton et en classe pour les élèves : ces situations procéderaient d'obstacles déterminés par les savoirs eux-mêmes et leur mise en forme, et

la distance qui les sépare de la construction théorique de Newton - que l'on pourrait presque qualifier de *bizarre*[618] - des représentations partagées à une époque au sein d'une culture. Tenter d'expliquer ces conceptions par le système perceptif humain (McCloskey, 1983) ne fait que rajouter une couche inutile à l'explication du phénomène, en tirant des liens peu probables au lieu de redonner son naturel à la complexité - et à l'étrangeté - de la théorie de Newton[619]. Koyré nous invite à ce renversement du problème, en parlant de la première loi de Newton[620] :

> *Le mouvement dont traite cette loi n'est pas le mouvement des corps de notre expérience, nous ne le rencontrons pas dans notre vie quotidienne. C'est le mouvement des corps géométriques (archimédiens) dans l'espace abstrait. C'est pourquoi il n'a rien à voir avec le changement. Le "mouvement" des corps géométriques dans l'espace géométrique ne change rien du tout ; les "lieux" dans un tel espace sont équivalents et même identiques. C'est un changement sans changement, si j'ose dire, un mélange étrange et paradoxal du même et de l'autre que Platon essaya d'accomplir, sans succès, dans son Parménide.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 32)*

Mais cette réinterprétation de la physique en termes mathématiques ne va pas sans une réinterprétation des mathématiques pour les adapter à la nouvelle physique. Ainsi Newton considèrent les entités mathématiques non plus dans leur "être", mais dans leur "devenir" ou dans leur "flux"" (p. 32), ce qui signifie que les figures de la géométrie, par exemple, sont "décrites par le mouvement dans l'espace de points ou de lignes". Koyré poursuit en disant qu'il s'agit d'un mouvement étrange, "qui se déroule dans un temps intemporel" (p. 32) : nous retrouvons les caractéristiques d'un système formel, axiomatisé et dès lors détaché du temps qu'il représente. L'approche de Newton consiste donc en la construction d'un système formel, dont la pertinence n'est pas basée sur les définitions (philosophiques) des notions - comme celle de *force* - mais bien plutôt sur l'adéquation des calculs prédictifs du modèle avec des mesures descriptives qui traduisent le monde physique en langage mathématique.

Or, lorsque dans une classe de Travaux Pratiques nous demandons aux élèves "d'interpréter un graphe", représentant la vitesse d'un chariot qui décélère, leur tâche consiste à réinterpréter les mathématiques dans un système formel où le mouvement est décrit par les courbes du graphe au fil d'un temps intemporel, mais qui en fin de compte - suite à la théorisation résultante d'un débat entre Newton et des nombreux autres physiciens - représente la vitesse du chariot là, devant eux. Ce ne sont plus les difficultés qu'il faut expliquer, mais bien les réussites d'un tel exercice de pensée. Bien entendu, de telles réussites n'apparaissent pas d'un seul coup, on se rend bien compte à la fois en examinant les détails historiques de l'élaboration du modèle

618. En fait, la solution de Newton peut apparaître comme une astuce pour résoudre un ensemble de problèmes - la forme elliptique des orbites des planètes, leur vitesse, etc. - à l'intérieur d'une construction théorique, problèmes qui n'ont pas d'emblée un sens hors de cet échafaudage théorique à voix multiples que constitue la philosophie de la Nature au $XVII^{ème}$ siècle.

619. Apparemment, nombre de modernes se sont sentis obligés de croire à la simplicité de la théorie Newtonienne parce qu'elle marche, faisant l'amalgame entre, d'une part, sa fonctionnalité ou son utilité pratique incontestable, et sa vérité - plus que douteuse, au fond ce n'est qu'une approximation astucieuse comme nous le verrons - et, d'autre part, entre la simplicité de la Nature (Koyré, 1968, p. 39) et la simplicité du modèle théorique de Newton qui, en tant que construction théorique, respecte effectivement admirablement le principe d'économie cher à la philosophie.

620. C'est un bon exemple pour mon propos, puisque les préconceptions décrites dans la littérature comme posant problème à l'enseignement consistent justement à distinguer *mouvement* et *repos* comme le faisait les autres modèles de physique.

de la mécanique classique [621] et en examinant les études de la fabrication de la science des sociologues, que dans le processus de *création de connaissances/savoirs* la pensée ne parvient à s'éloigner de ses conceptions actuelles que de quelques petits pas (ou *mouvements* selon le terme de Latour 1984/2001) lorsqu'elle parvient à développer une conception nouvelle. Pourquoi en serait-il autrement dans le processus d'apprentissage ? Si on le considère comme une *création de sens*, le processus d'apprentissage lui-même peut bien être le même que celui de fabrication des savoirs ou - dans le langage des historiens - de *découvertes*. Cela peut expliquer certaines similitudes de contenu entre les conceptions et les théories au cours de l'histoire des idées, similitudes cependant imparfaites, car un processus identique ne garantit pas un produit identique bien que, par la force des choses [622], certains de ces "produits" du processus de *création de sens* au sujet d'un problème donné se recoupent avec ceux du processus de *création de connaissances/savoirs*.

Ainsi, la culture fournit non seulement les savoirs, mais également les outils de la pensée [623] qui forment la base à partir de laquelle ces savoirs peuvent se développer. Bien entendu, dans ce processus de création de sens la dimension sociale [624] joue un rôle essentiel, mais c'est également vrai pour les découvertes comme le montre Koyré (1968) dans son approche mettant en évidence les interactions sociales de Newton avec les autres théories de son temps, ou Latour (1984/2001) au sujet de la découverte des microbes en interaction avec non seulement des personnes, mais aussi des institutions, des valeurs, un contexte politique, etc. Ces deux auteurs sont d'ailleurs plus proches que ne peut le laisser penser leur style de discours : dans les deux œuvres, il y a volonté de ne pas tomber dans un réductionisme [625] et de redonner, dans la description du cheminement de la pensée humaine, sa complexité de manière à la rendre plus naturelle. Je pense que cette approche est la bonne, en ce qu'elle permet de redéfinir ce qui est à expliquer (voir à ce sujet la section 7.3, p. 693) et est ainsi susceptible d'ouvrir le champ à une théorisation qui va au-delà des théories de la connaissance et de l'apprentissage dont nous disposons actuellement.

Si l'on pousse plus loin la comparaison entre processus d'apprentissage et processus de théorisation au fil de l'histoire des sciences, il n'est pas inintéressant de remarquer que, à l'instar du processus dialectique d'apprentissage mis en évidence par Piaget et d'autres, le développement des théories - notamment en physique - apparaît également comme une dialectique sur certains problèmes, problèmes sur lesquels la théorie dominante alterne au cours du temps en un mouvement de balancier qui semble infini. Ainsi, par exemple, l'atomisme que l'on trouve déjà chez Démocrite ($V^{ème}$ siècle avant J.-C.) et Lucrèce (I^{er} siècle avant J.-C.), est réfuté par les physiciens lorsque Newton amène sa théorie, au profit d'une théorie

621. Peut-être est-il utile de rappeler à ce sujet que Newton en a posé la théorie, exprimée en latin, et le système formel mathématique lui-même qui est utilisé aujourd'hui est postérieur à cette théorisation et procède à certains ajustements de la théorie initiale de Newton : par exemple, la *vis inertia* n'est plus nommée "force".

622. Plus précisément le nombre de possibilité de développement d'une conception donnée est probablement limité, quoiqu'elle puisse comprendre un grand nombre de possibilités.

623. Cette idée, associée à la psychologie de Vygotsky pour ce qui est du processus d'apprentissage, se retrouve également chez Spinoza au sujet du développement des savoirs au cours de l'histoire, comme nous le fait remarquer Koyré dans son ouvrage.

624. Que ce soit au sens des interactions sociales réelles ou de l'origine de notre pensée en tant que discours intériorisé (Todorov, 1981).

625. Pour une théorisation de ce point, voir le texte *Irréductions* (Latour, 1984/2001), et chez Koyré son introduction où il déclare s'intéresser autant aux errements et tentatives infructueuses de l'histoire de la pensée qu'aux succès, en ce qu'ils en apprennent davantage à l'historien.

corpusculaire. Or, Newton proposera une nouvelle théorie qui constitue, sur ce point, "une synthèse des deux tendances" (Koyré, 1968, p. 34). Ce n'est sans doute pas par hasard que c'est une synthèse qui permet de poursuivre l'investigation, jusqu'aux nouveaux développements de cette oscillation entre explication atomistique et corpusculaire que nous avons connu avec le développement de la physique quantique. La question de la matérialité de la lumière est un autre exemple où cette oscillation, ponctuée de synthèses, peut s'observer. Koyré en donne une illustration drôle :

> *Rien d'étonnant à ce que Pope ait pu s'écrier, à la fin du XVIIIe siècle, ce siècle qui fut témoin de la progression ininterrompue de la science newtonienne :"La Nature et ses lois étaient cachées dans les ténèbres.Dieu dit : Que Newton soit ! et tout fu lumière."Pope, évidemment, ne pouvait pas savoir que,"Ce ne fut pas pour longtemps, car le diable, hurlantHolà, qu'Einstein soit ! restaura le* statu quo.*"*
>
> *(Koyré, 1968, p. 38)*

Newton se serait-il trompé ? Sans aller jusque là, Koyré fournit néanmoins des indices que Newton lui-même n'a pas échappé à quelques malentendus, lorsqu'il interprète les textes des physiciens qui l'ont précédé. Ces malentendus ne sont d'ailleurs peut-être pas étrangers à l'originalité et à la créativité du modèle de Newton.

8.1.2 La méthode de Newton : entre malentendus et débats

La théorie de Newton a fait débat auprès de ses contemporains, lors de sa construction et et de son amélioration du vivant du physicien. La question qui nous intéresse ici consiste à examiner dans quelle mesure ces débats ne procèdent pas déjà de situations de malentendu : si c'est le cas, nous aurons une comparaison intéressante à faire avec les situations de malentendu apparues en milieu scolaire dans cette recherche. Toute similitude entre ces situations de malentendu historiques et celles identifiées dans une classe de notre époque permettrait de relever des risques d'ambiguïté liés à des savoirs spécifiques, et à leur formulation.

Koyré nous apprend que Newton avait pris beaucoup de soin pour communiquer son modèle théorique. Néanmoins, les débats dans lesquels il est engagé par ses contemporains montrent que - malgré ses efforts - sa théorie n'a pas toujours été comprise comme il le souhaitait. L'usage du langage joue un rôle important dans ce malentendu, en particulier autour de la notion d'*attraction* :

> *Il prit beaucoup de peine, cependant, pour expliquer que les forces d'attraction et de répulsion dont traite la philosophie naturelle, forces par lesquelles les corps soit s'approchent les uns des autres, soit au contraire se fuient et s'écartent, ne doivent pas être considérées comme les "causes" de ces phénomènes de mouvement mais comme des "forces mathématiques" dont les causes ne sont pas encore connues.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 189)*

Dans les textes de Newton, de nombreux passages laissent penser à ses contemporains qu'il "invente" une mystérieuse force invisible et s'exerçant à distance. Newton répond ainsi à cette fréquente objection à son modèle théorique :

> *Plus loin il explique que toutes les expressions dont il use pour désigner les forces centripètes, ou forces par lesquelles les corps s'approchent les uns des autres sont dépourvues de signification physique et doivent être considérées seulement comme des termes mathématiques que l'on peut remplacer les uns par les autres :*au reste, je prends ici dans le même sens les attractions et les impulsions accélératrices et motrices, et je me sers indifféremment des mots d'impulsion, d'attraction, ou de propension quelconque vers un centre : car je considère des forces mathématiquement et non physiquement ; ainsi le lecteur doit bien se garder de croire que j'aie voulu désigner par ces mots une espèce d'action, de cause ou de raison physique ; et lorsque je dis que les centres attirent, lorsque je parle de leurs forces, il ne doit pas penser que j'aie voulu attribuer aucune force réelle à ces centres que je considère comme des points mathématiques[6].
>
> *(Koyré, 1968, p. 190)*[6] Principia *(1687), Definitio VIII, p. 7.* [626].

Comment, dès lors, s'étonner de voir bien des enseignants se reposer sur la formule mathématique pour fournir la *véritable* définition de la force ? Newton prend cependant des précautions dans son usage du langage :

> *En outre, pour désigner les forces centripètes par lesquelles les corps tendent (*petunt*) les uns vers les autres, Newton le plus souvent n'emploie pas le terme* attractio *tout seul mais l'emploie en liaison avec le terme bien plus concret de Kepler* tractio*, en donnant à* tractio *un sens actif et à* attractio *un sens passif ; ainsi les corps se* trahunt *les uns les autres et sont* attracta *les uns par les autres (la traduction anglaise qui rend les deux mots par "attraction", bien qu'adoptée par Newton lui-même, estompe cette nuance assez importante).*
>
> *(Koyré, 1968, p. 193)*

Comme Grize (1982) l'a clairement expliqué, les concepts, même ceux d'un système formel, dont la *force* de Newton est un exemple, se construisent à partir des notions de la langue d'usage. Les difficultés que je discute ici sont donc inhérentes au processus de genèse des significations, autrement dit au moment historique de la construction de ces savoirs. Newton explique ses difficultés dans son emploi de la langue d'usage pour l'élaboration d'un système formel :

> *Newton, en conséquence, explique que, comme "l'attraction", "l'impulsion" ne doit pas être prise comme impliquant une signification* physique *déterminée ; il faut comprendre les deux termes de façon purement mathématique, c'este-à-dire comme dépourvus de toute référence au* modus producendi *des effets qu'on leur attribue ou encore comme neutres eu égard à n'importe quel* modus *analogue.*

626. Dorénavant, je me contente de signaler les citations effectuées par Koyré (1968) par le numéro de la note, par soucis de simplification, laissant le soin au lecteur intéressé de retrouver les sources des textes cités dans l'ouvrage de Koyré.

> Je me sers ici du mot d'attraction pour exprimer d'une manière générale l'effort [*conatus*] que font les corps pour s'approcher les uns des autres, soit que cet effort soit l'effet de l'action des corps, qui se cherchent [*petentium*] mutuellement, ou qui s'agitent l'un l'autre par des émanations, soit qu'il soit produit par l'action de l'éther, de l'air, ou de tel autre milieu qu'on voudra, corporel ou incorporel, qui pousse l'un vers l'autre d'une manière quelconque les corps qui y nagent. J'emploie le terme d'impulsion dans le même sens général, ne recherchant point dans ce Traité l'espèce de ces forces ni leurs qualités physiques, mais leurs quantités et leurs proportions mathématiques, comme je l'ai déjà dit [*explicui*] dans les Définitions[10].
>
> *(Koyré, 1968, p. 191)*

Par ce qui précède, ce ne serait pas abuser du terme que de dire que Newton a été victime de malentendus[627] à ce sujet. Koyré commente ceci de la manière suivante :

> *Il peut sembler assez surprenant qu'en dépit de ces déclarations très fermes et très précises de Newton on ait pu interpréter son enseignement, et on le fit, comme posant l'action à distance d'une force d'attraction résidant dans les corps ; en outre ces déclarations ne sont pas très différentes de celles qu'il fit en liaison avec son travail sur l'optique, et que les contenus mêmes des* Principia (Philosophiae naturalis principia mathematica) *- livre de mécanique rationnelle et d'astronomie mathématique - semblaient confirmer pleinement.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 191)*

Pourtant l'attitude consistant à poser des hypothèses dans la plus grande indifférence des explications philosophiques existait du temps de Newton, et même avant lui. Koyré nous rapporte les commentaires de Gallilée sur la gravitation comme exemple :

> *Quant à la gravité proprement dite, ce fut bien avant, en 1636, que Galilée affirma que nous ne savons pas ce que c'est - nous n'en connaissons que le nom -, que toutes les explications qu'en donnent les philosophes ne sont que des mots, et qu'il n'est d'aucun profit de chercher la nature de la gravité : il suffit de savoir que son action suit des lois mathématiques précises.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 192)*

Il y a quelque chose dans la schématisation même qui semble conduire les lecteurs de Newton - ou les élèves qui en apprennent la théorie - à des situations de malentendu au sujet de la force de gravitation. Koyré nous en fournit un "déballage" qui permet de saisir l'ambiguité dans l'oeuvre même du célèbre physicien :

> *En outre l'exemple donné par Newton d'une force "mathématique" en tant que distinguée d'une force "physique" n'était aucunement convaincant. Il est certain que nous ne pouvons pas attribuer*

627. Malentendus peut-être intentionnels, comme le suggère Koyré dans son ouvrage, puisque le débat visait souvent davantage à soutenir telle ou telle affiliation philosophique plutôt qu'à s'en remettre au meilleur modèle ; et dans ce débat philosophique, "mal comprendre" faisait partie intégrante des moyens rhétoriques visant à discréditer les postulats philosophiques de l'adversaire.

des forces à des points mathématiques, que ce n'est pas le point central d'un corps sphérique qui attire les corps placés en dehors de lui, et que deux corps qui décrivent des orbites semblables autour de leur centre commun de gravité ne sont pas attirés par leur centre commun de gravité - bien qu'ils se comportent comme s*'ils l'étaient et* comme si *toute la masse de chaque corps sphérique était concentrée dans son centre. Cependant n'est-il pas évident que, si les corps se comportent ainsi, ils le font parce que la force qui agit sur eux, et que nous pouvons bien appeler "mathématique", résulte de forces, nullement "mathématiques", que nous attribuons aux innombrables particules du corps sphérique central, ou aux corps eux-mêmes en révolution ?*

(Koyré, 1968, pp. 192-193)

Cette explication de Koyré, qui met en évidence un *comme si* implicite et problématique tant du point de vue de la compréhension de la théorie de Newton que du point de vue de son statut épistémologique, se rapporte directement à certaines difficultés classiques des élèves sur les tâches d'analyse des forces.

Au fond, peut-être que ses détracteurs avaient raison de mal le comprendre, au sens où c'était bien l'intention de Newton quoique sous couverte de précaution. Ainsi écrit Koyré :

Ainsi, même le lecteur mathématicien (...) comprendra sans doute - ou comprendra à tort - que Newton affirme l'existence dans les corps de forces par lesquelles ils agissent les uns sur les autres (se tirent les uns les autres, trahunt*), malgré la distance qui les sépare. Et comme il ne trouve jamais mention d'un milieu quelconque qui transmette cette action, le lecteur conclura, comme Huygens et Leibniz, et aussi comme Cotes, que Newton postule l'action à distance, sans vouloir cependant se compromettre, de même qu'en 1672, dans sa* New Theory about Light and Colors *il affirmait la structure corpusculaire de la lumière tout en niant qu'il le fît. Quant au lecteur non mathématicien, il acceptera l'attraction incompréhensible comme l'une des manières dont Dieu agit dans le monde.*

(Koyré, 1968, pp. 193-194)

Koyré cite Locke en exemple de lecteur non mathématicien. Ces analyses étayent, de mon point de vue, l'hypothèse que les précautions de Newton pour faire accepter sa théorie continuent de fonctionner comme un risque de malentendu dans l'enseignement de la mécanique classique aujourd'hui, par le biais des significations héritées historico-culturellement à travers le langage, son usage, sa structure, etc.

Mais ce processus historico-culturel de genèse des savoirs de mécanique se poursuit évidemment au-delà de Newton et de ses contemporains. Koyré relève quelques indices du développement de ces significations dans l'interprétation des auteurs des siècles suivants :

"Comme nous le voyons, la gravité ou attraction est devenue pour Maupertuis - et de même pour Voltaire - une question purement de fait. Elle a cessé d'être un problème comme elle l'était pour Newton lui-même. La pensée du XVIIIe siècle se réconcilia ainsi avec l'incompréhensible - à très peu d'exceptions près. Comme Ernst Mach le dit : "Elle s'habitua à utiliser des forces agissant à distance comme un point de départ donné pour l'explication, et le stimulant à s'enquérir de leur

> *origine disparut presque complètement." Plus tard le problème fut dissimulé avec beaucoup de succès dans le concept de champ.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 202)*

Suivant ces quelques indices, il semble qu'avec le processus historique - au moins dans un premier temps et avant la nouvelle construction que constitue la théorie d'Einstein - le malentendu est entériné par un nouveau sens commun, ayant perdu le questionnement qui soutenait la divergence des perspectives entre Newton et Descartes, par exemple.

Qu'en est-il des élèves qui - induits à réfléchir par leurs activités didactiques en sciences - réagissent à ce stimulant bien des siècles plus tard et souhaiteraient s'engager sur le problème de cette incompréhensible *attraction* ou *gravité* ?

8.2 Quelques réflexions sur le lien entre genèse des significations et enseignement

8.2.1 Des malentendus au temps de Newton à ceux d'aujourd'hui

Plusieurs précisions concernant l'attraction, ou la force d'attraction entre les corps, peut nous aider à comprendre les malentendus qui émergent dans les leçons de physique étudiées.

Tout d'abord, il faut savoir qu'à l'époque de Newton, personne ne croyait à l'action à distance. En effet, pour Newton comme pour ses contemporains, on ne peut agir où on n'est pas, et dès lors la gravitation nécessite l'action de Dieu, omniprésent (Koyré, 1968, p. 130). Pour lui, c'est "le système des mouvements des planètes qui "démontrent" l'action d'une force de gravitation et, réciproquement, sont expliqués par elle" (*idem,* p. 126).

La question de savoir ce qu'est la gravité est néanmoins vivement débattue à l'époque de Newton :

> *Pourtant, qu'est-ce donc que nous appelons gravité ? Ou même : qu'*est *la gravité ? Pour Huygens, bon Cartésien à cet égard, la gravité n'est pas, bien entendu, comme pour les Aristotéliciens, une propriété constitutive de certains corps (les lourds) de même que la légèreté est une propriété de certains autres (les légers) ; la gravité n'est pas non plus, comme pour Archimède et ses continuateurs des seixième et dix-septième siècles, une propriété essentielle de* tous *les corps ; non plus, comme pour Copernic et peut-être même pour Galilée, l'expression d'une tendance interne de parties homogènes à se réunir et à constituer un tout ; ni non plus, comme pour Kepler et Roberval, l'effet de l'attraction mutuelle entre ces parties et le tout. Au lieu de cela, la gravité est pour Huygens, comme pour Descartes, l'effet d'une action extérieure : les corps sont lourds parce que, et pour autant que, ils sont pressés et poussés vers la Terre par quelques autres corps - plus précisément par un cyclone de matière subtile ou liquide qui, à vitesse considérables, tourne autour de la Terre.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 160)*

Cet extrait met en évidence à la fois l'ancrage de Newton dans la manière de réfléchir de son temps, et le changement d'objectif qu'il y introduit : la *philosophie de la Nature* devient chez Newton la *philosophie mathématique de la Nature*. Newton présentait donc ses calculs en disant que tout se passe *comme si* cette force d'attraction s'exerçait, tout en précisant qu'il ne savait pas de quelle nature était cette attraction et tout en continuant d'en chercher le comment et le pourquoi. Après tout, on venait à peine de découvrir que l'air est un fluide invisible, et cette découverte laissait penser à toute sorte de substances invisibles - comme *l'éther* - qui permettaient de relayer une force d'un point à un autre à travers des réactions en chaînes. Une analogie très présente dans les débat sur le mouvement des planètes dans l'espace était celle des tourbillons que l'eau forme lorsqu'elle est agitée : ainsi, les Cartésiens imaginaient de grands tourbillons (p. 119) entre les planètes qui leur donnent leur mouvement et déterminent leurs trajectoires. Des théories alternatives étaient aussi proposées, comme l'idée des cordes de Kepler :

> *Comment agit cette "attraction" ? Gassendi prenant à la lettre l'image képlérienne de chaînes, cordes, ou nerfs, suppose que chaque particule du corps lourd est liée à la Terre par de fines cordelettes qui la tirent vers elle, ce qui, soit dit en passant, montre pourquoi il y a une différence de poids entre corps petits et corps gros - davantage de particules, davantage de cordes - et cela explique, en même temps, pourquoi les corps petits et les corps gros tombent au sol dans le même laps de temps : le plus gros est tiré avec une force proportionnelle à la* moles*, c'est-à-dire au nombre de particules qu'il contient, et il résiste à cette traction dans la même proportion :*
>
> Les choses se passent en dernière analyse comme si deux pierres ou deux globes faits de la même matière par exemple de plomb, l'un très petit l'autre énorme, étaient lâchés en même temps d'une même hauteur, atteignaient la Terre au même moment, et le très petit, bien qu'il ne pèse pas plus d'une once, avec une vitesse non moindre que le très gros bien que celui-ci soit de cent livres et plus ; sans doute le grand est tiré par un bien plus grand nombre de cordelettes mais il contient beaucoup plus de particules à tirer ; en sorte qu'il y a mesure commune entre force et masse [moles] et que de l'une et de l'autre il résulte de part et d'autre autant qu'il suffit pour l'accomplissement du mouvement dans le même temps. Chose très étonnante : si les globes étaient de matière différente, comme l'un de plomb, l'autre de bois, c'est à peine si l'un atteindrait la Terre plus tard que l'autre, c'est-à-dire celui de bois plus tard que celui de plomb ; puisque la mesure commune se fait de la même manière du fait qu'il y a autant de cordelettes que de particules.[8]
>
> *(Koyré, 1968, p. 214)*

Pour Newton, la gravité n'est pas une cause mécanique (Koyré, 1968, p. 128), notamment pour des raisons religieuses[628].

> *Newton lui-même, nous le savons bien, n'a jamais admis que l'attraction fût une force "physique". Il dit et répéta maintes et maintes fois que c'est uniquement une "force mathématique", qu'il est absolument impossible - non seulement pour la matière mais même pour Dieu - d'agir à distance c'est-à-dire d'exercer une action là où l'agent n'est pas présent ; qu'il ne faut donc pas considérer la force d'attraction - ceci nous donne un singulier aperçu sur les limites de ce qu'on appelle l'empirisme de Newton - comme une des propriétés essentielles et fondamentales des corps (ou de la matière), une de ces propriétés telles que l'extension, la mobilité, l'impénétrabilité et la masse qui ne peuvent être ni diminuées ni augmentées. Il dit et répéta que c'est une propriété qu'il faudrait expliquer ; qu'il ne pouvait pas le faire, et que, comme il ne voulait pas donner une explication fantaisiste quand une bonne théorie lui faisait défaut et comme la science (la philosophie mathématique de la nature) pouvait parfaitement bien continuer à progresser sans elle, il préférait n'en donner aucune (c'est là l'un des sens de son célèbre* Hypotheses non fingo*) et laisser la question ouverte.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 36)*

C'est dans ce contexte que Newton présente l'idée du vide - idée alors bien plus saugrenue que celle d'un éther remplissant l'espace entier et permettant des actions *apparemment* à distance, mais en fait transmise par un fluide invisible et intermédiaire. Cette idée de l'éther n'est d'ailleurs pas complètement

628. Le débat entre Newton et Descartes est aussi religieux : "Nous voyons ainsi que l'anticartésianisme de Newton n'est pas purement scientifique ; il est aussi religieux ; le cartésianisme est un matérialisme qui bannit de la philosophe naturelle toutes les considérations téléologiques, qui réduit toutes choses à la nécessité aveugle." (p. 127).

fausse, puisqu'elle préfigure à bien des égards la force électromagnétique que la science a pu étudier depuis, et qui traverse effectivement l'espace. En effet, les physiciens - dont Newton - étaient à la recherche d'une matière plus diluée ou plus petite permettant d'assurer des interactions et la propagation de la lumière sans pour autant se comporter comme un solide ou même comme un fluide (pour ce qui est de Newton).

> *Ce texte projette une lumière singulière sur la fin du* Scholium Generale *dans lequel, après nous avoir annoncé qu'il n'a pas encore été capable de découvrir la cause de la gravité, et qu'il ne feint pas d'hypothèse, Newton nous dit :*
>
> Ce serait le lieu d'ajouter quelque chose sur cette espèce d'esprit très subtil qui pénètre à travers tous les corps solides et qui est caché dans leur substance ; c'est par la force et l'action de cet esprit que les particules des corps s'attirent mutuellement aux plus petites distances, et qu'elles cohérent lorsqu'elles sont contiguës ; c'est par lui que les corps électriques agissent à de plus grandes distances, tant pour attirer que pour repousser les corpuscules voisins ; et c'est encore par le moyen de cet esprit que la lumière émane, se réfléchit, s'infléchit, se réfracte, et échauffe les corps ; toutes les sensations sont excitées, et les membres des animaux sont mus, quand leur volonté l'ordonne, par les vibrations de cette substance spiritueuse qui se propage des organes extérieurs des sens, par les filets des nerfs, jusqu'au cerveau, et ensuite du cerveau dans les muscles. Mais ces choses ne peuvent s'expliquer en peu de mots, et on n'a pas fait encore un nombre suffisant d'expériences pour pouvoir déterminer exactement les lois selon lesquelles agit cet esprit universel.[99]
>
> *(Koyré, 1968, p. 73)*

Ce passage étonnant de Newton ne peut m'empêcher de penser qu'il était sur la piste - quoique confusément - de l'énergie électromagnétique et atomique, de l'agitation des particules sub-atomiques, et qu'il était conscient de manquer de cette physique de l'infiniment petit pour pouvoir répondre à ses questions, physique qu'il ne pouvait développer faute d'instruments de mesure permettant les expériences indispensables pour émettre des hypothèses à cet échelon. En outre, que l'ensemble de ces énergies ou forces mystérieuses sont dénommées "esprit universel" met en évidence l'omniprésence de Dieu dans les investigations de la philosophie de la Nature. Quel que soit le langage utilisé, cependant, en lisant ces lignes nous sentons bien combien Newton est proche d'une physique contemporaine dans sa tentative d'expliquer l'attraction des masse.

> *Selon Newton, seules ces attractions corpusculaires, quelles qu'elles puissent être, sont réelles. Leur résultantes ne sont en aucun cas des forces réelles, mais seulement des forces "mathématiques". Ainsi ce n'est pas la Terre qui attire la Lune, mais chacune des particules de la Terre attire chacune des particules de la Lune. L'attraction globale qui en résulte n'a qu'une existence mathématique.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 48)*

Cette remarque met en évidence combien les raccourcis de langage, par exemple dire "La Terre attire la Lune" au lieu de "chacune des particules de la Terre attire chacune des particules de la Lune" peut porter à conséquence en physique. Si Newton prenait soin d'expliquer cela "maintes et maintes fois" (*idem*, p. 36), c'est que ses contemporains faisaient facilement ce genre de raccourcis - comme n'importe qui d'ailleurs - et cela avait une importance dans le débat qui les opposaient parfois sur des points aussi détaillés que

celui-ci. L'importance des détails, qui constitue l'un des résultats majeurs de cette recherche (voir section 7.1, p. 675), se vérifie aussi dans le processus historique de création des savoirs enseignés (voir aussi à ce sujet : Latour & Woolgar, 1979).

Ce que l'on enseigne rarement, c'est que l'introduction du vide permet à Newton une distinction entre *l'espace* et la *matière*, qui étaient pensés ensemble ou - autrement dit - *confondus*[629], ce qui lui permet d'affirmer à la fois deux contraires : "la discontinuité de la matière et la continuité de l'espace" (Koyré, 1968, p. 34). Mais dans le débat autour de l'introduction du vide, Dieu constitue le problème principal : l'espace devient l'émanation du Dieu pour Newton, associant étendue et esprit, alors que Descartes craignait l'identification de Dieu à l'infini dans un sens matériel, n'ayant pas distingué espace et matière (*idem*, p. 111). Mais au fond le vide a d'abord été introduit sur Terre avant d'être pensée dans le Ciel, suite au vide créé par Boyle pour montrer que toute résistance disparaît, permettant à Newton d'écrire :

> Les projectiles n'éprouvent ici-bas d'autre résistance que celle de l'air, et dans le vide de Boyle la résistance cesse, en sort qu'une plume et de l'or y tombent avec une égale vitesse. Il en est de même des espaces célestes au-dessus de l'atmosphère de la Terre.[149]
>
> *(Koyré, 1968, p. 129)*

Or, dans la transposition des savoirs de mécanique dans la séquence d'enseignement observée dans cette recherche, c'est le raisonnement inverse qui est proposé : le vide y est associé à *l'espace* - aujourd'hui cela fait partie du sens commun - et on ne l'observe pas sur Terre. On retrouve ici un autre résultat important de cette recherche : les difficultés procédant d'un *cheminement à sens inverse* dans le processus de schématisation, pour qui *reconstruit* la schématisation (voir section 7.2, p. 687).

8.2.2 Des malentendus de Newton à ceux des élèves

Nous avons vu que Newton n'était pas toujours interprété de la manière dont il le souhaitait. Lui-même, malgré son assimilation exemplaire des savoirs de physique de son temps, n'a pas toujours repris les théories de ses prédécesseurs telles qu'elles étaient comprises par la majorité. Koyré donne l'exemple d'une compréhension quelque peu créative des explications galiléennes de la chute libre par Newton :

> *"Nous allons revenir à la théorie de Galilée mentionnée par Newton à propos du "passage de Platon". Si les planètes "descendent avec des gravités uniformes et égales, ainsi que le suppose Galilée", nous dit Newton, elles ne peuvent pas toutes partir du même endroit. Nous l'admettons volontiers. Il nous reste, cependant, à préciser le sens de l'expression : "descendent avec des gravités uniformes et égales". En effet, cette formule peut vouloir dire des choses assez différentes ; notamment : a) selon Galilée, l'action du la gravité est partout uniforme et constante et, par conséquent, les corps - tous les corps, grands et petits, lourds et légers - tombent toujours avec la même vitesse et ce où qu'ils soient placés, près ou loin de la Terre (ou, en l'occurrence, du Soleil) ; en*

629. Il me semble que la confusion en une seule classe-objet de ce qui fait, dans la schématisation plus avancée, plusieurs classes-objets, constitue le pendant cognitif de bien des malentendus.

> *d'autres termes, que l'accélération* due à la gravité *est une constante universelle ayant la même valeur partout dans le système solaire ; ou bien, b) selon Galilée, tous les corps, et donc aussi toutes les planètes, "tombent" avec la même vitesse, qu'elle soit constante ou non, et, par conséquent, si elles partent du même endroit et tombent ensemble en traversant les mêmes espaces, elles ont aux mêmes "hauteurs" par rapport au Soleil des vitesses égales, sans que cette assertion implique la constance de l'accélération qui pourrait varier avec la distance, comme la force d'attraction, et même en fonction de celle-ci.*
>
> *Quelle interprétation devons-nous donner à la formule newtonienne ? C'est-à-dire : quel sens a-t-elle dans l'esprit de Newton ? ce n'est pas là une question oiseuse. En effet, a) représente la théorie galiléenne de la chute dans sa vérité historique ; b) au contraire, une adaptation - mésinterprétation - postérieure ; a) implique une connaissance directe et précise de l'œuvre de Galilée ; b) ne l'implique aucunement. Or, il semble clair que c'est le sens b) que lui donne Newton...*
>
> *(Koyré, 1968, p. 253)*

Il s'agit ici précisément du problème que rencontrent plusieurs élèves lorsqu'ils répondent à la question des deux balles, interprétant tantôt {même force} comme une force s'exerçant pareillement sur toutes les masses, et donc d'autant plus intense que la masse est importante, tantôt comme une force identique en intensité quelle que soit la masse considérée, nuance qui distingue le cheminement de Henriette et de ses camarades, par exemple, comme le met en évidence l'analyse de la situation de malentendu #2 (voir section 6.3.3.2, p. 417).

Un autre exemple de glissement de sens effectué par l'interprétation newtonienne des significations concerne les notions de *mouvement*, *quantité de mouvement* et *inertie*. Les termes latins pour mouvement, *motu*, impulsion, *impedimentum*, et quantité de mouvement dont l'anglais à gardé l'original *momentum*, sont tous très proches et leurs significations ne sont pas encore établies dans la langue d'usage : chaque auteur propose ses définitions, reprenant partiellement celles des autres. Voici un bref aperçu de ces nombreuses définitions, présenté par Koyré :

> *[Wallis] explique qu'il appellera* momentum *ce qui produit le mouvement et* impedimentum *ce qui s'y oppose, que si le* momentum *est plus fort que l'*impedimentum *le mouvement se produira ou s'accélérera, et à l'inverse se ralentira ou s'arrêtera si l'*impedimentum *est plus fort que le* momentum*, et que si le* momentum *et l'*impedimentum *sont de force égale (*si aequipollent*) le mouvement ne sera ni produit ni arrêté mais que ce qui existait avant, mouvement ou repos, persévérera...*
>
> *(Koyré, 1968, pp. 223-224)*

Il n'est pas inintéressant de remarquer que le terme inertie ne provient pas de ces variantes formées sur la racine de *motu*, liée au mouvement, mais du qualificatif d'une force introduite par Newton : la *force intérieure*, *vis inertia*, ou encore *force innée* ou *force inhérente*[630] (Koyré, 1968, p. 224). Newton, dans ces

630. Ainsi, la notion *inertie* suggère par ses relations au lexique en français, une propriété intérieure ou inhérente à l'objet. Je suggère ici que la difficulté d'enseigner cette notion, largement reconnue par les enseignants et la recherche en didactique, a notamment à voir avec l'histoire un peu tortueuse du concept dès sa discussion par Newton qui, après une première version de sa mécanique comportant des *forces intérieures*, renonce par la suite à les nommer *force* et ne garde que l'*intérieur*, l'*inertie*.

matières, est largement tributaire des significations élaborées - et en cours d'élaboration - par les autres philosophes de la Nature :

> *Quant à Newton, dans son* Waste Book *de 1664 il écrit : "Ax.2. Une quantité se mouvra toujours sur la même ligne droite (sans changer la détermination ou la vitesse de son mouvement) à moins que quelque cause extérieure ne l'en détourne". Il affirme cependant, à la suite de Descartes, que "chaque chose persévère dans l'état où elle se trouve à moins que quelque cause externe ne l'en dérange*[9] *".*
>
> *Dans le* De gravitate et aequipondio fluidorum*, Newton utilise la formule cartésienne dans sa définition de la force (*vis*) et de l'*inertia *:*
>
> Déf. V. La force est le principe causal du mouvement et du repos. Et elle est soit un principe externe qui engendre ou détruit ou modifie de quelque manière le mouvement qu'il imprime à un corps quelconque, soit un principe interne par lequel le mouvement ou le repos mis dans un corps est conservé ; et tout être s'efforce de persévérer dans son état et oppose de la résistance à ce qui l'en empêche... Déf. VIII. L'inertie est la force interne d'un corps en sorte que son état ne soit pas facilement modifié par une force qui lui est appliquée du dehors[10].
>
> *(Koyré, 1968, p. 224)*

Ces définitions - rarement sinon jamais enseignées telles quelles aujourd'hui dans les cours de mécanique de lycée - font réfléchir aux difficultés rencontrées dans l'apprentissage des concepts de *force* et d'*inertie*. En effet, nous n'avons gardé de Newton que les *forces extérieures* - dont on ne dit plus qu'elles sont extérieures, puisqu'elles ne s'opposent plus aux *forces intérieures* - mais cela ne rend-t-il pas la perspective newtonnienne plus difficile à comprendre ? Cela ne rend-il pas le rapport entre les concepts d'*inertie* et de *force* définitivement mystérieux ? Nous sommes là probablement confrontés à deux logiques différentes : la logique de la *langue d'usage* (Grize, 1982) avec laquelle travaille l'apprenant et avec laquelle travaillaient aussi les philosophes de la Nature [631] et la logique formelle des systèmes fermés mathématiques. La première logique a besoin de l'opposition entre *forces extérieures* et *forces intérieures*, alors que la seconde exige d'abandonner la notion de *force* pour celle d'*inertie* de manière à établir une définition mathématique du concept de *force*, cette définition mathématique ne fonctionnant pas pour *l'inertie* dans le système fermé établi.

Si Newton part des définitions de Descartes pour la *force* et l'*inertie*, c'est bien lui qui modifie légèrement les significations attachées au repos et au mouvement dans la philosophie de la Nature - mais cette nuance est d'une grande importance théorique - lorsqu'il introduit un nouvel usage des notions avec les expressions *état de mouvement* et *état de repos* :

> *Je voudrais souligner que les expressions "état de mouvement" et "état de repos" ne sont employées ni par Huygens, ni par Wallis, ni même par Hooke.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 223)*

631. Logique à laquelle Newton a justement ajouté celle des mathématiques en procédant à des mesures de phénomènes dont il ne cherchait l'explication qu'après coup, renversant ainsi la priorité dans la construction des savoirs entre logique naturelle - liée à la langue d'usage - et (nouvelle) logique formelle - liée à des relations mathématiques.

Ainsi, dans sa première version des *lois* - que Newton avait nommées *hypothèses* jusque là - son interprétation des concepts de *force* et d*'inertie* prend un sens nouveau :

> *Le ms. D présente le même texte que B et C mais change* hypothesis *en* lex *:*
>
> Loi I : Par sa seule force innée un corps continue toujours d'aller uniformément en ligne droite si rien ne l'en empêche.
>
> Loi II : Le changement d'état de mouvement ou de repos est proportionnel à la force imprimée et se produit sur la ligne droite sur laquelle cette force est imprimée.[14]
>
> *Finalement le* De Motu Corporum*, que je crois être encore plus tardif, contient la formule complète des* Principia *:*
>
> *Déf. 3 : La force qui réside dans la matière (*vis insita*) est le pouvoir qu'elle a de résister. C'est par cette force que tout corps persévère de lui-même dans son état actuel de repos ou de mouvement en ligne droite.*
>
> Cette force est toujours proportionnelle à la quantité de matière des corps, et elle ne diffère de ce qu'on appelle l'inertie de la matière, que par la manière de la concevoir : car l'inertie est ce qui fait qu'on ne peut changer sans effort l'état actuel d'un corps, soit qu'il se meuve, soit qu'il soit en repos ; ainsi on peut donner à la force qui réside dans les corps le nom très expressif de *force d'inertie.*
>
> Le corps exerce cette force toutes les fois qu'il s'agit de changer son état actuel, et on peut la considérer alors sous deux différents aspects, ou comme résistante, ou comme impulsive : comme résistante, en tant que le corps s'oppose à la force qui tend à lui faire changer d'état ; comme impulsive, en tant que le même corps fait effort pour changer l'état de l'obstacle qui lui résiste.
>
> On attribue communément la résistance aux corps en repos, et la force impulsive, à ceux qui se meuvent ; mais le mouvement et le repos, tels qu'on les conçoit communément, ne sont que respectifs : car les corps qu'on croit en repos ne sont pas toujours dans un repos absolu.[15]
>
> *(Koyré, 1968, p. 225)*

Finalement, la véritable avancée de Newton est un petit pas de plus dans l'état des savoirs de son temps auquel de nombreux savants ont participé. Voici un extrait de l'analyse que fait Koyré des liens entre les avancées de Newton et de Huygens, physicien contemporain, qui illustre combien proche Huygens se trouvait proche de la solution newtonienne :

> *Ceci signifie que Newton avait réussi à faire quelque chose que Huygens, qui avait découvert la loi de la force centrifuge, aurait pu faire... mais n'avait pas fait : 1° à partir de sa formulation de la gravitation universelle (inversement proportionnelle aux carrés des distances) Newton pouvait démontrer la forme elliptique des orbites planétaires dont Huygens doutait parce qu'il était resté incapable de les reconstruire par des moyens purement mécaniques (c'est-à-dire au moyen de mouvements circulaires) ; et 2° Newton établissait cette loi de gravitation universelle en étendant à tout le système solaire l'attraction képlérienne s'exerçant entre la Terre et la Lune (chose que Huygens, qui n'admettait pas une telle "attraction", ne faisait ni ne pouvait pas faire), et il déterminait la force centripète, qui retenait les planètes sur leurs orbites, au moyen du théorème de la force centrifuge (que Huygens avait établi avant Newton mais n'avait pas réussi à appliquer aux mouvements célestes).*
>
> *(Koyré, 1968, p. 158)*

Qu'y a-t-il donc de si scientifique dans la représentation du monde physique de Newton ? Sur quoi se base la *physic envy* (Latour, 2000) dont il fait l'objet depuis des siècles ?

8.2.3 De la théorisation à l'apprentissage : cheminement à sens inverse

Koyré exprime bien dans ce passage la traduction en langage mathématique du monde matériel, qu'opère Newton :

> *En d'autres termes toutes les causes formelles et finales disparaissent comme modes d'explication de la science nouvelle - ou sont rejetées par elle - et sont remplacées par des causes efficientes et même matérielles. Seules ces dernières ont cours et sont reconnues dans le nouvel Univers de la géométrie hypostasiée et c'est uniquement dans ce monde abstrait mais réel (archimédien), où des corps abstraits se meuvent dans un espace abstrait, que les lois de l'être et du mouvement de la nouvelle science - la science classique - sont valables et vraies.*
>
> *Il est facile maintenant de comprendre pourquoi la science classique a - comme on l'a souvent dit - substitué au monde de la qualité celui de la quantité. Précisément parce que, comme le savait déjà fort bien Aristote, il n'y a pas de qualités dans l'univers des nombres ni dans celui des figures géométriques. Il n'y a pas de place pour elles au royaume de l'ontologie mathématique.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 30)*

Néanmoins, si c'est vrai au sens de fournir une schématisation cohérente et en adéquation avec (la plupart) des expériences scientifiques au sujet de la matière, du mouvement et de la lumière, lorsqu'il s'agit d'utiliser cette mécanique classique pour construire un pont ou pour envoyer un homme sur la lune, par exemple, le qualitatif revient à la charge. Même si les expériences de Newton et de ses contemporains jouent un rôle important dans le débat, elles ne peuvent se faire sans penser et même travailler au qualitatif, dans ce que Koyré nomme à plusieurs reprises "l'ingéniosité" de ces philosophes de la nature. Newton produit et polit lui-même ses prismes pour ses expériences sur la lumière, car sans cela il n'aurait pas à disposition un verre d'une qualité suffisante pour mettre en évidence son expérience cruciale (Verlet, 1993). C'est dire combien le qualitatif fait le physicien, non seulement dans la mise en œuvre d'expériences, qui nécessitent des instruments de haute qualité, mais aussi dans l'élaboration d'un modèle qui dispose, ou non, des qualités requises en termes de représentation du réel, de pouvoir prédictif, etc.

Dès lors, lorsqu'un élève doit faire le chemin inverse intellectuellement, ce qualitatif réapparaît aussi, bien que différemment : l'élève ne comprend plus, d'une part, pourquoi le modèle a été élaboré ou, s'il se contente de faire ce que l'enseignant demande, il ne sait pas comment "analyser la situation", c'est-à-dire passer de ses perceptions qualitatives ou d'une consigne qui décrit qualitativement une "situation", à un modèle de physique permettant son analyse. C'est que le lien entre le système formel et ce qu'il représente, dont Grize (1982) nous apprend qu'il est établi lors de la théorisation, est soudainement perdu si l'on ne considère que le résultat de cette modélisation, sans regarder aussi le processus qui permet d'y aboutir. Celles et ceux qui n'ont pas vécu le processus d'élaboration de la théorie ne comprennent dès lors pas le

lien avec ce qui est représenté par le modèle, à moins d'explications *ad hoc* ciblées sur ce problème en particulier [632].

Quelle est donc la nature de ces savoirs élaborés par Newton et ses contemporains ? La mécanique de Newton constituait-elle un système formel comme on le présente aujourd'hui dans l'enseignement ?

632. Encore que, même dans ce cas, le succès en termes d'apprentissage dépend d'un grand nombre de facteurs liés à la mise en scène didactique, et est reconnu difficile à obtenir pour les enseignants.

8.3 Physique et psychologie : que sont les savoirs de la physique newtonienne ?

8.3.1 Le sens classique et traditionnel d'*hypothèse*

Newton élabore un système formel, quoiqu'à son époque ce système n'est encore que dans sa phase de théorisation, et comprend plusieurs versions successives. Il comprend néanmoins déjà les éléments qui deviennent ses *axiomes*. Ces éléments ne sont d'abord que des *hypothèses*, au sens "classique et traditionnel" [633], nous dit Koyré :

> *Les lois du mouvement ou de la gravitation universelle, par exemple, ne sont-elles pas des hypothèses ? Sans aucun doute, aussi longtemps du moins qu'on prend ce terme dans son sens classique et traditionnel, celui justement dans lequel le prend Newton dans la première édition de ses* Principia. *Hypothèse, alors, je le répète veut dire admission, ou supposition fondamentale, de la théorie.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 57)*

Ces hypothèses sont, du point de vue épistémologique, comme les axiomes [634] : il s'agit de les *admettre*, pour ensuite voir ce que cela nous permet de faire. Autrement dit, il s'agit d'une expérience de pensée [635] qui est notamment validée par son utilité, par ce qu'elle nous permet de faire. Cette utilité est parfois une utilité théorique : l'hypothèse nous permet alors de penser ce qui ne pourrait l'être sinon. Cela a deux conséquences :

— d'une part, si une telle hypothèse est concluante elle deviendra un axiome du système, qui demeure invérifiable en tant que tel mais permet à l'ensemble du système d'être cohérent, économique, etc. ;

— d'autre part, avant même de savoir si une telle hypothèse est concluante, il faut y adhérer au moins l'espace d'un instant pour pouvoir mener l'expérience de pensée qui permet de connaître son utilité [636].

Dès lors, ce sens classique de terme *hypothèse* est très intéressant, à la fois pour la psychologie et pour la physique, car il nous informe sur la tâche que l'on demande aux élèves de physique : *admettre* telle

633. C'est également ce sens "classique et traditionnel" que j'ai repris dans cette recherche, pour une théorisation de l'apprentissage à partir des situations de malentendu étudiées, mais en psychologie : c'est une réponse (partielle) à l'invitation de Lewin (1931, 1935) de reprendre de la physique les principes d'une *science*, quoiqu'en situant ces principes sur le plan épistémologique plutôt que méthodologique, comme on le voit le plus souvent avec la pratique de mesures permettant des modèles quantitatifs, et visant un savoir prédictif. Mes hypothèses, *a contrario* de cette imitation grossière de la physique newtonienne en psychologie (voir à ce sujet p.ex. : Toomela, 2008 ; Valsiner, 1999, 2005), porte spécifiquement sur le sens particulier que prennent des discours, événements et actions dans les situations et les histoires singulières des personnes.

634. C'est d'ailleurs le nom que leur donnera Newton par la suite (cf. Koyré, 1968, p. 61, et note 46, p. 78), les ayant initialement nommées hypothèses dans *Principia*.

635. Sur l'importance des expériences de pensée dans la science, voir par exemple Gendler (1998).

636. Cette conséquence est non seulement très importante pour la pratique - et l'apprentissage ! - de la science, mais également pour la coordination des points de vue en général : il n'est guère possible de coordonner son point de vue à celui d'autrui, sans avoir au préalable *imaginer*, par expérience de pensée, ce que *fait*, dans sa conscience propre, que d'adopter le point de vue d'autrui, c'est-à-dire sans avoir constaté par soi-même l'utilité et les effets d'adopter le point de vue singulier en question.

ou telle loi pour pouvoir, *ensuite*, apprendre à l'utiliser et constater son utilité pour résoudre certains[637] problèmes.

Mais le terme *hypothèse*, à l'époque de Newton, "n'est aucunement univoque" (Koyré, 1968, p. 57), ce qui en fait un bon exemple de terme ambigu - même pour des spécialistes - à partir duquel se développent des malentendus. D'autant plus que des auteurs comme Newton ou Descartes se trouvaient sous la pression d'une vérification de la conformité de leurs écrits avec les dogmes chrétiens, de telle sorte que les historiens ont souvent remis en question la sincérité de s'en remettre aux hypothèses comme une tactique visant à distinguer leur opinion personnelle de leur œuvre. S'il est désormais avéré que Newton recherchait sincèrement à rendre compte de la présence de Dieu dans la Nature, notamment à travers des recherches secrètes (Verlet, 1993), sa foi était susceptible de prendre une forme bien différente de la version officielle de l'Église de son temps. Quant à Descartes, la question est plus douteuse encore, ce qu'illustre notamment sa manière de reprendre la procédure scientifique par hypothèse jusqu'à en faire la déduction du vrai à partir du faux :

> *Il est même possible d'accentuer davantage le caractère fictif de l'hypothèse, comme, par exemple, dans les fameuses déclarations de Descartes qui nous dit dans ses Principes de Philosophie (III, 44) : "Je désire que ce que j'écris soit seulement pris pour une hypothèse, laquelle est peut-être fort éloignée de la vérité ; mais, encore que cela fût, je croirais avoir beaucoup fait si toutes les choses qui en sont déduites sont entièrement conformes à l'expérience."*
>
> *Descartes, de plus, renchérit malicieusement et insiste sur le divorce entre la vérité et les prémisses hypothétiques avancées par lui, en annonçant "Que même j'en supposerai ici quelques-unes [hypothèses] que je crois fausses", et cependant "que leur fausseté n'empêche point que ce qui en sera déduit ne soit vrai".*
>
> *(Koyré, 1968, p. 59)*

De là, des lecteurs font un pas de plus dans le glissement de sens en considérant que Descartes proposes de "démontrer les choses de la nature par des causes fausses". Il s'agit là encore d'un malentendu, en ce qu'une hypothèse n'est justement pas une cause. Je ne saurais dire comment Descartes l'entendait, mais, Newton au moins distinguait clairement ses lois - des hypothèses au sens classique nous l'avons vu - des causes qui en expliqueraient la présence et au sujet desquelles il avouait, concernant l'attraction, qu'il n'en avait aucune à proposer et ne voulait pas en proposer de mauvaises[638]. Ainsi, une fois de plus, il semble que Newton était bien plus au clair quant à l'épistémologie de sa construction que nombre de ses lecteurs. Ce qui était pensé comme une *hypothèse* au sens classique, ensuite renommé *axiome* ou *loi*, est finalement vulgarisé au cours des siècles comme une "loi de la Nature" de manière à induire une épistémologie fort

637. Même dans la très belle construction théorique de Newton, une hypothèse comme celle des lois du mouvement ne permet de résoudre que certaines situations : par exemple, les lois du mouvement ne permettent pas de répondre à la question que j'ai énoncée lors de l'étude pilote du logiciel *Marbles Move*, dans la situation du choc entre une bille en mouvement et deux billes immobiles en contact l'une avec l'autre, à savoir "Pourquoi une seule bille se met en mouvement quand toutes les billes ont la même masse alors que les deux billes immobiles se mettent en mouvement lorsque la bille qui vient les percuter a une masse doublée par rapport aux billes immobiles ?".

638. Comme Koyré le montre clairement, c'est ce qu'il entendait par *Hypotheses non fingo* : je ne feins pas d'hypothèse, je ne fais pas semblant d'en avoir quand je n'en ai pas ; ce qui, bien entendu, ne l'empêchait pas de faire des hypothèses quand il pensait en avoir de bonnes.

différente : il ne s'agit plus d'*axiomes* permettant la construction d'un système formel [639] ("mathématique" dirait Newton) permettant de rendre compte des phénomènes et, surtout, d'agir et prédire les résultats de nos actions sur le monde physique, mais de *lois* régissant la Nature exactement telles qu'elles sont décrites par Newton et par les mathématiques. Cette forme de "réalisme" naïf consiste à prendre le modèle pour la réalité [640], dont il ne fait que *tendre à* donner une représentation symbolique : il constitue une situation de malentendu par rapport à ce que Newton avait l'intention de faire avec sa physique, qui se construit par des glissements de sens comme celui que je viens de montrer autour du terme *hypothèse*. De plus, du point de vue épistémologique, ce "réalisme" est non seulement faux en tant qu'épistémologie [641], mais aussi en tant que physique, puisque la mécanique de Newton n'est qu'une approximation de la réalité qu'elle représente, certes brillante au niveau intellectuel, mais néanmoins partiellement *exacte* dans sa fonction de représentation des phénomènes, comme les moyens d'investigation du siècle dernier ont permis aux physiciens de le montrer.

De même, les concepts de *temps absolu* et d'*espace absolu* de Newton (Koyré, 1968, p. 123) fonctionnent comme des abstractions profitables au système qu'il construit, sans qu'il ait pour autant la moindre raison de postuler son existence à partir de l'observation de phénomènes. Newton le reconnaît par exemple au sujet de l'*espace absolu* puisqu'il discute du fait que nous n'arrivons pas, en tant qu'humains, à rapporter le mouvement à des lieux absolus (*idem,* pp. 124-125).

Néanmoins, je ne voudrais pas donner l'image que toute la physique newtonienne est le produit d'une imagination, somme toute aussi fantaisiste que d'autres. Autrement dit, Newton n'est pas seulement un bon théoricien qui est parvenu à saisir les axiomes permettant le système le plus cohérent et économique de la philosophie de la Nature, mais il a enregistré des succès pratiques, documentés dans ses expériences. Du point de vue épistémologique, nous l'avons vu avec Grize au chapitre 3 (section 3.3.3, p. 175 et suivantes), cela ne change rien au fait que les axiomes sont invérifiables. Par contre, durant le processus de théorisation, l'adéquation avec les faits joue un rôle essentiel pour parvenir à ces axiomes, autrement dit pour les choisir et les choisir bien. Par exemple, dans l'expérience cruciale en optique qui a rendu Newton célèbre, c'est le fait d'effectuer des mesures précises dans une expérience maintes fois effectuée avant lui, mais sans ces mesures. Mais il développe également de nouveaux instruments - par exemple un télescope à réflexion (Koyré, 1968, p. 80) - et produit ses prismes lui-même, pour parvenir à des mesures d'une précision suffisante.

Si Newton s'est effectivement dressé contre les hypothèses, c'est en particulier contre les hypothèses métaphysiques :

> *"Les hypothèses métaphysiques", nous dit Newton, "ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale". Il semble clair cependant que les convictions métaphysiques jouent, ou du*

639. Voir à ce sujet la section 3.3.3, p. 175.
640. De manière analogue à la manière dont les élèves prennent par accident le mot pour la chose, lorsqu'ils passent par le discours pour acquérir les connaissances scientifiques.
641. Ce qui signifie que cette interprétation réaliste des lois de la Nature attribue aux savoirs que constitue le système de la mécanique newtonienne des propriétés qu'ils n'ont pas, il s'agit donc d'une épistémologie erronée de la physique.

moins ont joué, un rôle important dans la philosophie de Sir Isaac Newton. Son acceptation de deux absolus - l'espace et le temps - lui permit de formuler ses trois lois fondamentales du mouvement, de même sa croyance en un Dieu partout présent et partout agissant lui permit de dépasser à la fois l'empirisme plat de Boyle et Hooke et le rationalisme étroit de Descartes, de renoncer aux explications mécaniques et, bien qu'il eût lui-même rejeté toute action à distance, d'édifier son monde comme un système de forces dont la philosophie naturelle devait établir les lois mathématiques : par induction, non par spéculation pure. Ceci parce que notre monde a été créé par la seule volonté de Dieu ; nous ne devons pas, par conséquent, lui prescrire son action mais seulement découvrir ce qu'il a fait.

La croyance en la création comme arrière-plan de la science empirico-mathématique - cela semble étrange. Mais le cheminement de la pensée humaine, dans sa recherche de la vérité, est très étrange en effet.

(Koyré, 1968, p. 131)

La force d'attraction des corps ou force gravitationnelle serait-elle une action à distance exercée par Dieu ? Voilà qui paraît assez éloigné des savoirs enseignés...

8.3.2 De la physique newtonienne aux savoirs enseignés

Si l'on s'intéresse à la théorisation des forces par Newton, il faut bien admettre que la physique enseignée aujourd'hui a élagué la mécanique de plusieurs forces imaginées par son concepteur.

Il y a tout d'abord l'inertie, présentée par Newton d'abord selon la formule cartésienne, avec la définition suivante où elle est pensée comme une force intérieure en contraste aux forces extérieures :

Déf. V. La force est le principe causal du mouvement et du repos. Et elle est soit un principe externe qui engendre ou détruit ou modifie de quelque manière le mouvement qu'il imprime à un corps quelconque, soit un principe interne par lequel le mouvement ou le repos mis dans un corps est conservé ; et tout être s'efforce de persévérer dans son état et oppose de la résistance à ce qui l'en empêche...

Df. VIII. L'inertie est la force interne d'un corps en sorte que son état ne soit pas facilement modifié par une force qui lui est appliquées du dehors.

(Koyré, 1968, p. 224)

Plus tard, Newton utilise le terme de *vis insita* (*idem,* p. 225), la force innée, et elle est considérée sous deux aspects : comme *résistance* et comme *impulsion*.

Dans nos classes, l'inertie n'est pas considérée comme une force, et cela n'est pas sans poser de réelles difficultés aux élèves. En effet, les analyses de la situation de malentendu #7 (section 6.8, p. 631) montrent qu'ils dessinent souvent une force sur les objets en mouvement rectiligne uniforme, vecteur qui pourrait

représenter l'inertie. En outre, la compréhension du principe d'inertie[642] par les élèves est réputée très difficile : qu'est-ce donc que *inertie* si ce n'est pas une *force* ?

Newton, au cours de sa théorisation, défendait (Koyré, 1968, p. 93) la quantité de mouvement ($m \cdot v$) - concept cartésien - comme une mesure de force alors que Leibniz et Huygens considérait la *vis viva* ($m \cdot v^2$) comme la force. Nous ne rappelons pas ces faits pour montrer que Newton aussi s'est parfois trompé, au cours de sa théorisation, mais bien pour montrer que nous n'enseignons plus aujourd'hui que le produit final - la théorie axiomatisée de Newton - alors que c'est dans le processus de théorisation que se trouvent les éléments clefs dont les élèves en situation de malentendu ont besoin pour comprendre cette théorie. En effet, comme l'exprime clairement (Koyré, 1968, pp. 93-94) :

> *La pensée humaine est polémique ; elle se nourrit de négation. Les vérités nouvelles sont les ennemies des anciennes qu'elles doivent transformer en erreurs. Il est difficile de reconnaître la dette que l'on doit à ses ennemis. Pourtant la pensée de Newton s'est formée et développée, presque* ab ovo*, par opposition à celle de Descartes.*
>
> *(Koyré, 1968, pp. 93-94)*

Concernant la première loi, la loi d'inertie, Koyré montre comment elle est liée à une conception cartésienne, en partant du texte en latin de Newton. Par exemple :

> Status[643] *de mouvement : en employant cette expression Newton implique ou affirme que le mouvement n'est pas, comme on l'avait cru pendant environ deux mille ans - depuis Aristote - un processus de changement, par opposition au* repos*, qui est véritablement un* status*, mais qu'il est aussi un* état*, c'est-à-dire quelque chose qui n'implique pas plus le changement que ne le fait le repos. Le mouvement et le repos sont, comme je viens de le dire, situés par ce mot au même niveau d'être, et non plus à différents niveaux, comme ils l'étaient encore pour Kepler qui les comparait aux ténèbres et à la lumière,* tenebrae et lux*.*
>
> *(Koyré, 1968, pp. 94-95)*

Dès lors, il m'apparaît essentiel pour comprendre le système de Newton de connaître ce processus de théorisation en opposition à Descartes, avec lequel s'est constituée la théorie newtonienne. Cela d'autant plus que Descartes est plus compréhensible[644] que Newton dans son expression de la conservation du mouvement (l'*inertie*) et de l'action d'un corps sur l'autre, principes qui posent des problèmes bien connus aux élèves ou novices en physique, comme en témoigne le passage suivant :

> *... quand un corps en pousse un autre, il ne saurait lui donner aucun mouvement, qu'il n'en perde en même temps autant du sien ; ni lui en ôter, que le sien ne s'augmente d'autant. Cette règle,*

642. Cela peut avoir à faire avec le fait que le principe d'inertie qui inspira Newton est celui formulé par Descartes, que Newton a beaucoup travaillé à réfuter.

643. Terme latin utilisé par Newton (note de l'auteur).

644. Peut-être que cela a quelque chose à voir avec le fait qu'elle est moins formalisée que celle de Newton, ce qui sans doute paraîtra moins abouti au physicien expert, mais qui peut permettre de faire le lien avec la théorie newtonienne pour l'apprenant qui ne dispose justement pas encore des concepts (voir à ce sujet l'idée des *notions intermédiaires* proposées par Tiberghien (1989b) et discutée à la section 7.4.2, p. 703 et suivantes).

> *jointe avec la précédente, se rapporte fort bien à toutes les expériences, dans lesquelles nous voyons qu'un corps commence ou cesse de se mouvoir, parce qu'il est poussé ou arrêté par quelque autre. Car, ayant supposé la précédente, nous sommes exempts de la peine où se trouvent les dotes, quand ils veulent rendre raison de ce qu'une pierre continue de se mouvoir quelque temps après être hors de la main de celui qui l'a jeté : car on nous doit plutôt demander pourquoi elle ne continue pas toujours de se mouvoir ? Mais la raison est facile à rendre, car qui est-ce qui peut nier que l'air, dans lequel elle se remue, ne lui fasse quelque résistance ?*
>
> *(Descartes, cité par Koyré, 1968, p. 99)*

C'est exactement ici le raisonnement que devraient mener les élèves de notre recherche pour parvenir à une analyse - qualitative et ne nécessitant aucun calcul mathématique - de l'item #1 (voir la discussion de la situation de malentendu #2, section 6.3.6, p. 441 et suivantes).

Ce que l'on découvre également chez Descartes (Koyré, 1968, p. 101), c'est que l'idée même de la conservation (conservation du mouvement mais sans doute aussi la recherche de constante dans l'univers) vient de l'idée de l'immutabilité divine dont il faut rendre compte dans la Nature. Cette idée n'est pas sans affiliation à la manière dont l'enseignant a appris de la tradition locale d'enseignement, à insister sur la constante g et sa valeur ($9.81\frac{m}{s^2}$), dans la classe étudiée : petit morceau de catéchisme louant la beauté de l'immutabilité divine, sous la forme d'un enseignement dogmatique de la physique qui ne provoque pas tant la compréhension des auditeurs que leur révérencieuse admiration. Ce que l'existence de l'école doit aux pratiques religieuses, dans la filiation historique européenne, se manifeste encore de nos jours sous certains aspects.

De plus, ce n'est que plus tard que la conservation du mouvement sera considérée valide seulement si le système est "clos" : pour Descartes, il s'agit de considérer et expliquer l'ensemble de la Nature. La portée de cette conservation d'origine divine a donc été grandement limitée, ce qui, une fois de plus, va dans le sens d'une meilleure épistémologie : ayant mieux compris la nature des systèmes formels, il a été possible de circonscrire plus explicitement le domaine de validité de savoirs qui, s'ils ne sont pas valables partout et tout le temps, n'en demeurent pas moins vrais, valables et utiles dans des cas particuliers. Mais c'est alors déjà, sur le plan philosophique, renoncer aux fameuses *lois de la Nature*.

La théorie de Descartes concernant la quantité de mouvement n'a pas seulement vu son domaine de validité réduit, elle a aussi subie des transformations plus profondes : en effet, Descartes avait dans son système des *forces de résistance* définies comme *quantité de repos*, à l'origine de lois du choc tout à fait erronées (Koyré, 1968, p. 102). Nous sommes en droit de nous demander pourquoi Descartes - qui savait bien que ses lois du choc n'étaient pas confirmées par l'expérience commune - soutient néanmoins de telles lois.

En tant que chercheur en éducation, je suis bien emprunté de découvrir que la raison qu'en donne Descartes est la même que celle que nous donnons pour défendre la théorie de Newton - considérée correcte, celle-là. En effet, voici cette argument sous le plume de Koyré :

> *[Descartes] explique que sa loi, juste en soi, présuppose des conditions qui ne sont pas réalisées - et ne peuvent l'être* - in rerum natura, *autrement dit que les corps en question soient complètement séparés non seulement l'un de l'autre mais aussi du reste du monde, qu'ils soient absolument rigides, etc.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 103)*

Autrement dit, c'est une situation analogue à celle de la balle de plomb et de la plume qui tombent dans le vide : ils devraient atteindre le sol en même temps, selon la théorie de Newton, mais les conditions ne sont jamais exactement atteintes dans l'expérience commune (*in rerum natura*), puisqu'il faudrait faire un vide parfait ou aller sur la Lune pour le vérifier (et encore...). Dès lors, il n'est guère facile de faire la différence entre les deux arguments pour les élèves, et même le physicien ne le peut qu'après coup, fondé sur la croyance[645] quant à l'histoire des sciences, à savoir que Newton avait raison et Descartes tort.

Si on comprend bien pourquoi il a fallu abandonner la quantité de repos - et d'autres concepts mis en défaut - il n'en demeure pas moins que pour le novice, il apparaît encore aujourd'hui nettement plus compréhensible d'apprendre un concept de *quantité de mouvement* sachant qu'il y a également une *quantité de repos*, tout comme dans la théorie newtonienne il apparaît plus compréhensible d'apprendre qu'il y a des *forces intérieures* s'il y a aussi des *forces extérieures*. Devoir apprendre un concept de *quantité de mouvement* qui n'est pas une *force*, un principe d'*inertie* qui n'est pas une *force* non plus, mais qui tous deux déterminent le mouvement des objets comme le font les *forces* est autrement plus difficile à accepter. Au final, le physicien d'aujourd'hui se servira de la *quantité de mouvement*, de l'*inertie* ou de la *force* selon les situations et les problèmes : dès lors, la difficulté conceptuelle héritée de théories dont on n'a gardé que quelques éléments au détriment d'autres, se transpose dans l'*usage* des concepts, relevant de l'expertise du physicien, et échappe aux définitions et formules mathématiques. Autrement dit, les obstacles pour l'apprentissage des élèves ne se trouvent plus dans les énoncés de la théorie, mais dans les *usages* (ou non) de tel ou tel concept pour telle ou telle situation ou partie d'un problème : les pierres d'achoppement rencontrées au cours du processus de théorisation sont reléguées à l'implicite, dans la situation d'enseignement et d'apprentissage.

Ainsi, Newton a développé sa théorie en référence à de nombreux autres travaux, s'éloignant progressivement de la physique de ses contemporains et prédécesseurs en examinant de nombreuses alternatives qu'il a pris le temps de soigneusement réfuter (Koyré, 1968, p. 121). Or, en général, l'enseignement ne dit mot de ce développement progressif, de ce processus de théorisation, un peu comme si il n'y avait pas de physique, et puis soudainement Newton est arrivé et la physique a été créée. L'histoire est en fait très différente : si l'on reconnaît comme le fait Koyré (1968) que Galilée avait dépassé la conception scolastique du mouvement en affirmant qu'il se conserve indéfiniment - mais le mouvement était alors circulaire - et que Gassendi affirmait que "tous les corps, une fois mis en mouvement, se mouvraient éternellement et uniformément dans la même direction" (*idem,* p. 96) et qu'il conclut qu'il en va ainsi pour tout mouve-

645. D'ailleurs, pour la plupart, c'est une croyance toute dogmatique puisque fort peu nombreux sont ceux qui ont eu l'occasion de faire une quelconque expérience même de pensée démontrant la supériorité de la théorie de Newton.

ment, il reste à Newton de les considérer comme des *états* et l'ajout de l'expression "en ligne droite" [646]. Ceci met bien en évidence combien cette théorisation se fait par petits pas, au cours de l'histoire. Cela ne diminue en rien le mérite de Newton, une fois encore, à supposer qu'il s'agisse là d'un point important, car ces petits pas, aussi infimes soient-ils, sont aussi difficiles que leurs conséquences peuvent être de grande ampleur. Ainsi, par exemple, le *mouvement en ligne droite* implique un univers *infini*[647], et l'univers *infini* implique de distinguer *espace* et *matière*[648] de manière à pouvoir imaginer un espace *infini* qui ne suppose pas une *matière infinie*[649] : le *vide*.

Au vu de ces quelques réflexions, nous sommes en droit de nous interroger, en tant qu'enseignant ou en tant que chercheur : pourquoi les définitions de base de la physique sont-elles si peu enseignées ? Est-ce parce qu'il s'agit de philosophie ? Newton présent pourtant son oeuvre en commençant par choisir et définir son vocabulaire, ce qui permet d'établir les fondements indispensables à toute démarche scientifique :

> *Newton commence, comme il le fera toujours, par des Définitions et nous informe que les termes* quantité, durée *et* espace *n'ont pas besoin d'être définis ; en outre, ils ne peuvent pas l'être puisque nous les connaissons mieux que tous les termes par lesquels nous pourrions essayer de les définir. Mais il définit*
>
> *I.* Le lieu *comme* la partie d'espace qu'une chose remplit entièrement *;*
>
> *II.* Le corps *comme* ce qui remplit un lieu *;*
>
> *III.* Le repos *comme* permanence dans le même lieu ;
>
> *IV.* Le mouvement *comme* un changement de lieu *ou, si l'on préfère,* transit, translation, ou migration d'un corps d'un lieu à un autre, *le terme* corps *étant pris non au sens philosophique de substance physique douée de qualités sensibles, mais, par abstraction de celles-ci, à la manière des géomètres, comme une chose étendue, mobile et* impénétrable[77]*.*
>
> *(Koyré, 1968, p. 106)*

La première partie de cet extrait met en évidence ce que Grize relève comme une dépendance d'un système formel à la langue naturelle : Newton était conscient des limites, dans sa théorisation, et de la dépendance de son modèle théorique, *in fine*, envers ce que l'on connaît par la langue naturelle (*lieu*, *corps*, *repos*, etc.). Ne serait-il pas utile d'enseigner ces définitions pour comprendre pourquoi *espace* et *matière* sont distingués, et pourquoi on parle du *vide* et de l'*infini* ? En outre, seule une approche de ces définitions par la problématisation (voir à ce sujet p.ex. : Buty & Plantin, 2008 ; Fabre & Musquer, 2009 ; Orange, 2005a) permettrait (peut-être) aux élèves d'en saisir l'importance : l'enjeu n'est évidemment pas de les mémoriser sans les comprendre, mais bien de comprendre pourquoi et comment Newton en est arrivé à les définir ainsi et pas autrement. Une telle démarche nécessite probablement des apprentissages à la problématisation bien en amont du lycée et de l'enseignement de la physique newtonienne, comme le

646. "Quant un mouvement rectiligne, il [Galilée] n'en parle jamais, en fait, comme d'un mouvement en droite ligne, il parle de mouvement horizontal ou de mouvement sur un plan horizontal." (Koyré, 1968, pp. 95-96).
647. Koyré compare la croyance des Grecs anciens qui voyaient dans le mouvement circulaire le seul pouvant être véritablement constant, en disant qu'ils avaient tort au vu de la mécanique newtonienne, mais qu' on "pourrait même soutenir que pour leur Univers, univers fini, ils avaient raison : la loi d'inertie implique un univers infini" (Koyré, 1968, p. 95).
648. Voir Koyré, 1968, p. 34 et p. 98.
649. Même dans la physique actuelle, la quantité de matière est considérée finie en raison du principe d'entropie.

propose par exemple Tozzi (2002), de manière à ce que l'aspect philosophique de ces savoirs ne constitue plus un prétexte pour reléguer la théorisation à l'implicite.

Nous avons vu que Newton ne se risque guère à définir la *nature* de l'attraction entre les corps. A-t-on répondu à cette question aujourd'hui ? Vers 1915, la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein émet l'hypothèse que la gravitation n'est pas une force au sens classique, mais une manifestation de la déformation de l'espace-temps sous l'effet de l'énergie de la matière qui s'y trouve. Pourtant, dans l'enseignement de la physique, la théorie de Newton est rarement discutée en relation avec la relativité générale, souvent considérée comme trop complexe. Malgré la pertinence que peut avoir l'enseignement d'une telle action à distance du point de vue didactique (Tiberghien & Weil-Barais, 1987), adhérer à une action à distance n'était pas acceptable dans le contexte du débat en philosophie de la Nature.

8.3.3 De la mécanique classique à la mécanique quantique

La relativité restreinte apparaît au tout début du $XX^{ème}$ siècle, comme une conséquence des lois de l'électromagnétisme découvertes au $XIX^{ème}$ siècle, notamment suite à une observation étonnante :

> *un observateur en mouvement par rapport à une source lumineuse va toujours mesurer la même vitesse de propagation de l'onde lumineuse émise, indépendamment de sa propre vitesse par rapport à la source.*
>
> *(Beck, 1993, p. 5)*

Beck nous indique que cette observation mène la physique à une nouvelle transformation - la transformation de Lorenz - qui a pour conséquence de changer le fondement de la mécanique, ce qui est considéré *absolu* ou *constant* de manière universelle :

> *Contrairement à la vue de Newton, ce qui est absolu ce n'est ni le temps, ni l'espace, mais c'est la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide ! La théorie de la relativité mène alors immédiatement à une première mise en question de la séparation absolue entre objet et observateur : la durée d'un processus physique et la longueur d'un objet physique dépendent de l'état de mouvement de l'observateur qui mesure ces quantités. Il est impossible d'observer ces effets dans la vie quotidienne, puisque la vitesse de référence - celle de la lumière dans le vide - est trop grande à l'échelle du mouvement de l'homme. Néanmoins les prédictions de la relativité restreinte ont été vérifiées avec une précision impressionnante par l'expérience.*
>
> *(Beck, 1993, pp. 6-7)*

Ce changement de point de référence de la physique, s'il n'a pas de conséquence sur l'application de la mécanique classique aux situations de la vie quotidienne, vu que la précision des calculs y est suffisante, amène cependant à un changement important du point de vue épistémologique, comme l'explique Beck :

> *C'est la célèbre "dualité particule-onde" qui règne dans le monde microscopique et qui introduit un élément nouveau dans notre perception de la réalité : un même système physique doit être décrit par des concepts différents suivant le type de question que l'on pose.*
>
> *(Beck, 1993, p. 8)*

Ce problème est lié à ce qu 'il est impossible de prédire la trajectoire d'une particule singulière, dans l'expérience classique des diaphragmes qui a servi à mettre en évidence la diffusion de la lumière, quand bien même on peut donner les probabilités qu'elle se trouve à tel ou tel endroit, et on peut déterminer le spectre de diffusion d'un ensemble de particules. Pourtant, cette "impossibilité de savoir" n'est pas due à des variables aléatoires : "l'aspect probabiliste intervient seulement au niveau de l'interprétation physique des résultats calculés" (Beck, 1993, p. 9). Ainsi, la mécanique quantique nous permet pas seulement d'aller plus loin dans la précision des calculs prédictifs concernant la réalité microscopique, elle permet également de définir les limites de ce que l'on peut prédire :

> *La mécanique quantique résume, dans un cadre mathématique précis, "ce que nous pouvons savoir" sur un système physique. Cette information est obligatoirement limitée. Typiquement nous avons le choix entre des renseignements dits "complémentaires" sur la réalité physique : si nous voulons déterminer la position d'une particule qui passe à travers le diaphragme avec une grande précision, nous y mettons une seule fente étroite. Mais la théorie montre (et l'expérience le confirme !) que plus la fente est étroite plus la distribution de probabilité de trouver à la suite la particule en un point donné du plan est* étalée *: la certitude concernant le passage à travers le diaphragme entraîne une grande incertitude quant à l'endroit d'arrivée sur le plan P, et vice-versa.*
>
> *(Beck, 1993, p. 8)*

Cette réflexion montre que les raisons qui ont mené les physiciens à utiliser des situations très particulières pour démontrer des éléments précis d'une théorie - ou pour convaincre d'un ajustement nécessaire de la théorie - et parallèlement les raisons qui ont mené les enseignants de la physique à introduire tel ou tel concept avec des situations spécifiques, sont bien plus profondément ancrées dans la nature même des savoirs construits qu'une simple *tradition* ou *habitude* : c'est parfois une nécessité épistémologique. Ce sont ces mêmes conséquences épistémologiques de la science physique actuelle, qui m'ont conduit à adopter, pour cette recherche en sciences humaines, une épistémologie perspectiviste (voir section 2.2.2, p. 57 et suivantes).

En outre, non seulement les savoirs sont intimement liés aux situations qui ont permis leur découverte et/ou leur construction, mais la mécanique quantique montre également qu'ils dépendent de l'activité concrète et située du sujet connaissant :

> *La mesure d'une propriété physique d'un système atomique nécessite, en général, une intervention "grossière" de la part de l'expérimentateur (boucher une fente, etc.) qui provoque une évolution du système, après l'intervention, qui est différente de celle qui aurait eu lieu sans cette intervention.*
> *(...)*

> *Il faut encore une fois souligner le fait que cette théorie fonctionne merveilleusement dans la pratique du physicien qui a accepté les règles du jeu et a appris à "poser les bonnes questions" auxquelles la théorie fournit des réponses vérifiables. Cependant un des pionniers de la physique de notre siècle, Albert Einstein, a été d'avis, jusqu'à la fin de sa vie, que la mécanique quantique devrait un jour être complétée et implantée dans une théorie plus puissante, qui donnerait - même pour le monde microscopique - plutôt le type de réponses auxquelles nous sommes habitués par la physique classique.*
>
> *(Beck, 1993, pp. 9-10)*

Ce passage est particulièrement intéressant pour le problème de l'enseignement et de l'apprentissage de la mécanique : il s'agit également d'apprendre "à poser les bonnes questions", celles auxquelles le modèle permet de répondre... L'importance du questionnement dans l'enseignement des sciences a récemment fait l'objet de publications (Fabre, 2011 ; Ligozat & Orange, 2017 ; Orange, 2005a) centrées sur le processus de *problématisation*. Pourtant, cette partie essentielle du savoir-faire du physicien, reste encore rarement travaillée dans les pratiques en milieux scolaires. Cela ne signifie pas non plus que le modèle, les savoirs de physique, sont arbitraires. Il y a de nouveau un lien étroit à considérer entre ce qui fait qu'une question est bonne, la nature du modèle construit, et le problème pour lequel les physiciens ont construit ce modèle. Beck en discute au sujet de ce qu'il appelle la "troisième révolution", après celle de la relativité restreinte [650] et celle de la mécanique quantique [651], qui est la mise en évidence des systèmes non linéaires. Les deux premières "révolutions" concernait l'infiniment petit : à présent, il s'agit d'en tirer les conséquences pour des systèmes à l'échelle humaine. Pour le dire très simplement, dans certains cas les imprécisions infimes de la mécanique classique mises en évidence par la mécanique quantique n'auront pas que des conséquences infimes au niveau du système à une échelle macroscopique. Ce sont les cas où il n'est plus possible d'isoler le système sans prendre le risque de se tromper sur le résultat de la prédiction. La conséquence épistémologique qui m'intéresse ici en relation à l'apprentissage de la physique est de taille : il s'agit de montrer, d'une certaine manière, qu'en enseignant la mécanique classique on peut construire une illusion de prédictibilité et de fonctionnement du monde physique en système fermé qui n'est, au fond, qu'un cas particulier, un succès exceptionnel, et - qui de plus est - un cas particulier lié aux objets d'étude spécifique auxquels s'intéresse la mécanique classique. En outre, même pour ces objets d'étude, le modèle formel ne représente pas parfaitement [652] les phénomènes, dont la complexité échappe toujours en partie à la modélisation.

> *D'une part, il s'est avéré que le mouvement d'un grand nombre de particules qui constituent un système macroscopique peut être extrêmement complexe, malgré la relative simplicité des équations d'évolution. En effet, si Newton avait cherché à comprendre en détail l'écoulement dans une chute d'eau, plutôt que "simplement" la chute libre d'un objet rigide, il n'aurait probablement jamais réussi à déceler une loi simple et reproductible entre force et mouvement. D'autre part, même en*

650. Montrant que l'absolu n'est ni le temps ni l'espace mais la vitesse de propagation d'une particule.
651. Montrant que la position d'une particule en particulier est imprévisible dans certains cas, quand bien même nous connaissons la distribution d'ensemble et que le modèle est tout à fait déterministe et ne fait pas intervenir d'éléments aléatoires comme en statistique.
652. Il faut tout de même négliger de nombreux éléments inévitables dans les situations réelles, dont le frottement est un exemple classique

> *ce qui concerne le mouvement d'une seule ou de plusieurs particules la régularité et la simplicité de la trajectoire d'une pomme qui tombe d'un arbre ou d'une planète gravitant autour du soleil trompent : le cas générique du mouvement dans la nature est bien plus compliqué.*
>
> *(Beck, 1993, p. 11)*

Comment prendre en considération la complexité des savoirs à enseigner dans la pratique de l'enseignement ?

Dans l'établissement scolaire où s'est déroulé la recherche, cette question a conduit les enseignants à organiser un séminaire interdisciplinaire en co-enseignement, articulant philosophie et physique, de manière à *raconter* l'histoire d'une science qui se construit progressivement, en lien avec son contexte historique et culturel, et à mettre en débat l'histoire des idées, par exemple en discutant des modèles désormais abandonnés mais considérés valables à une époque. Cette manière de répondre vise à expliciter les règles du jeu intellectuel auquel la physique classique s'est adonné [653]. Il s'agit, du point de vue épistémologique, d'assumer le fait que toute entreprise intellectuelle est finalisée et débute par des questions, même si celles-ci peuvent finalement être dépassées par la construction des savoirs effectuée. C'est une manière de faire entrer la problématisation dans l'enseignement : pour les élèves, apprendre à "poser les bonnes questions" devient plus important que de donner des réponses *conformes*. S'il reste à déterminer si ce sont les élèves ou l'enseignant qui effectuent la problématisation, cette manière de présenter les savoirs permet au moins de leur redonner un validité écologique, en la situant dans l'époque et la culture où ils ont été construits.

Lemeignan et Weil-Barais (1993) proposent plutôt de suivre le développement des représentations des élèves, dans une approche développementale, où les *modèles précurseurs* sont considérés *précurseurs* en fonction de la progression cognitive des élèves, et non au vu de l'histoire. C'est une attitude positive face aux erreurs des élèves, et un milieu didactique accueillant les savoirs dans leur complexité, qui permet alors aux élèves de prendre progressivement la mesure de l'articulation entre les questions qu'ils posent et les savoirs enseignés, et qui insiste sur l'importance des processus de raisonnement effectués par les élèves eux-mêmes. Cette approche fournit aussi une réponse pratique au problème que pose la complexité des savoirs à enseigner : les savoirs sont enseignés à divers degrés de complexité, en réponse aux questions des élèves.

Néanmoins, nous avons vu dans ce chapitre combien les questions posées sont inextricablement liées aux savoirs élaborés par la science pour un objet étudié particulier. Même lorsque ces savoirs sont axiomatisés sous la forme de lois générales ou de modèle formel, un ensemble de règles d'usage demeure indispensable à son utilisation. Ces règles ne garantissent pas seulement une tradition, mais la cohérence intellectuelle des savoirs avec leur usage, et sont donc indispensables à la valeur épistémique des savoirs considérés.

653. Évidemment, ces règles du jeu ne sont présentées que de manière simpliste ici : elles mériteraient une description plus détaillée, mais le but ici est uniquement de mentionner une perspective avec laquelle aborder de manière plus authentique l'exercice intellectuel proposé aux élèves.

Si le savoir-faire du physicien consiste notamment à "poser les bonnes questions", il comprend de nombreuses compétences d'ordres différents. L'une de ces compétences, qui reste souvent implicite à l'école, consiste à savoir transposer une situation réelle en une situation modélisée, selon les possibilités offertes par un modèle. Ces possibilités dépendent des questions et des objets d'études qui ont permis la construction du modèle : celles et ceux des constructeurs de la théorie, à un moment donné de l'histoire humaine. Or, la situation réelle demeure toujours plus complexe que sa modélisation, comme nous le rappelle Beck dans la citation ci-dessus. Lemeignan et Weil-Barais (1993) relèvent d'ailleurs à ce propos les limites de l'*inquiry learning*, que nous avons également constatées :

> *Aussi loin que l'on puisse pousser l'exploitation de données expérimentales, les concepts n'émergent pas d'eux-mêmes. Le miracle empiriste ne se produit pas. De fait, les concepts ne surgissent de l'expérience que si on les connaît déjà, ce qui est certes le cas du professeur, mais pas celui des élèves.*
>
> *(Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p. 51)*

Alors que les neurosciences tentent de faire une physique de la psychologie, en réduisant les processus psychiques à leurs supposés substrats physiques, c'est une psychologie de la physique qui permet de comprendre pourquoi ce "miracle empirique" ne se produit pas : l'apprentissage ne peut être modélisé que comme un "système ouvert" (Grize, 1982), car ce processus fait partie des cas où une intervention extérieure au système - même minime - peut avoir des conséquences de grande ampleur sur l'ensemble de l'état ultérieur du système, ou aucune, selon la situation.

En outre, l'arrivée du modèle de la mécanique quantique a modifié les questions, à tel point que Einstein espère sa théorie dépassée par une nouvelle, qui permettrait de retrouver les questions de la mécanique classique. Ici, Beck précise quelque peu ce point en ajoutant ceci :

> *(...) l'idée que la réalité ne se révèle qu'après intervention d'un observateur peut nous mettre en conflit avec le concept de la causalité et du principe relativiste de la propagation d'information à une vitesse finie. Cette antinomie n'est pas définitivement résolue à l'heure actuelle, bien que les tentatives d'introduire des "variables cachées" dans la théorie (qui porterait les secrets que la théorie connue ne veut pas nous révéler) n'aient pas été compatibles avec les expériences.*
>
> *(Beck, 1993, p. 10)*

Le problème épistémologique soulevé par Beck sur le changement des "bonnes questions" consécutif du changement de modèle en mécanique rejoint la discussion de la causalité de Halbwachs (1975), qui montre que cette notion de causalité[654] fonctionne pour les élèves comme une notion intermédiaire. Ce

654. Pour une discussion des limites du concept de *causalité* dans la science contemporaine, voir par exemple Bergman (2009) ; Bunge et al. (1971) ; Esfeld (2007) ; Gagnon (1975) ; Hmelo-Silver, Marathe, et Liu (2007) ; Jacques (1980) ; Kistler (1999) ; Piaget (1937/1967a, 1974a) ; Popper (1992) ; Russell (1913) ; Toomela (2008) ; von Wright (1971) et accessoirement Kohler (2014a), et pour son usage et ses enjeux dans l'apprentissage des sciences, voir par exemple Andersson (1986) ; Besson (2005) ; Ogborn (1993) ; Perkins et Grotzer (2005) ; Reiner et Gilbert (2004) ; Rumelhard (2000) ; Tiberghien (2004) ; Tina (2003) ; Viennot (1993). Alors que l'origine et la précocité du raisonnement causal fait encore débat en psychologie du

problème épistémologique fait également écho à ma critique des "bonnes questions" en psychologie : plutôt que de prédire des comportements individuels, il s'agit de s'interroger dans une démarche historique et microgénétique sur les relations et interactions entre les divers échelons auxquels s'observent les choix, et en particulier celui qui consiste à donner du *sens* à son milieu et aux événements, choix que les personnes effectuent *en situation*, et que seule *une science de la singularité* peut décrire.

développement (voir p.ex. : Aschersleben, Henning, & Daum, 2013 ; Bélanger & Desrochers, 2001 ; Danks, 2007 ; Desrochers, 1999, 2003, 2005 ; Gardner, 1979 ; Koerber, Sodian, Thoermer, & Nett, 2005 ; Michotte, 1954 ; Pauen, 1996 ; Piaget, 1927, 1967a ; Reed, 1997 ; Rochat, 2006 ; Saxe & Carey, 2006 ; Sobel & Sommerville, 2009 ; Sperber et al., 1995 ; Wang, Kaufman, & Baillargeon, 2003), son usage par le raisonnement du sens commun est reconnu par la psychologie sociale (voir p.ex. : Deschamps & Clémence, 1990 ; Ghiglione & Richard, 1999 ; Hewstone, 1989 ; Poliakov, 1980 ; Windisch, 1982), qui a largement démontré les biais que ce concept introduit dans la modélisation de la réalité sociale, et les limitations sévères du raisonnement causal, qu'il faut rapprocher des travaux cités en amont quant à l'usage aujourd'hui très limité du concept dans les sciences contemporaines. Ces travaux, issus de champs distincts, mériteraient une mise en dialogue sur la base d'une revue de la littérature plus complète que celle que j'esquisse ici. Une telle synthèse permettrait probablement d'étayer la thèse de la *causalité* comme notion intermédiaire, non seulement pour les apprenants, mais aussi dans l'histoire des sciences. Il s'agit cependant d'un travail considérable, auquel j'ai dû renoncer.

C'est en cela que consiste la tragédie de l'esprit moderne qui "résolut l'énigme de l'Univers", mais seulement pour la remplacer par une autre : l'énigme de lui-même.

(Koyré, 1968, p. 3)

Références bibliographiques

Abrami, P., Chambers, B., Poulsen, C., De Simone, C., D'Apollonia, S., & Howden, J. (1996). *L'apprentissage coopératif : Théories, méthodes et activités.* Montréal : De la Chenelière.

Abreu, G. D. (2000). Relationships between macro and micro socio-cultural contexts : implications for the study of interactions in the mathematics classroom. *Educational Studies in Mathematics*, *41*, 1-29.

Adey, P., Shayer, M., & Yates, C. (1989/2001). *Thinking Science*. Cheltenham : Nelson Thornes Ltd.

Aebli, H. (1951). *Didactique psychologique*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé S.A.

Albe, V. (2005). Un jeu de rôle sur une controverse socio-scientifique actuelle : Une stratégie pour favoriser la problématisation ? *Aster*, *40*, 67-94.

Andersson, B. (1986). The experential gestalt of causation : a common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, *8*(2), 155-171.

Apostel, L., Cellérier, G., Desanti, J. T., Garcia, R., Granger, G. G., Halbwachs, F., ... Sinclair de Zwaart, H. (1970). *L'explication dans les sciences*. Paris : Flammarion.

Apostel, L., Grize, J.-B., Papert, S., & Piaget, J. (1963). *La filiation des structures*. Paris : Presses Universitaires de France.

Apothéloz, D. (1997). Les dislocations à gauche et à droite dans la construction des schématisations. In : A. Berrendonner & D. Miéville (Eds.), *Logique, discours et pensée* (p. 183-217). Berne : Peter Lang.

Apothéloz, D., Miéville, D., & Vergès, P. (1989). Démarche argumentative et démarche sociologique dans l'étude des représentations des nouvelles technologies. *Communications*, 1-12.

Aqueci, F. (1997). Vers une sémio-éthique. In : D. Miéville & A. Berrendonner (Eds.), *Logique, discours et pensée. Mélanges offerts à Jean-Blaise Grize.* (p. 325-344). Berne : Peter Lang.

Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *9*(3), 281-308.

Arvaja, M., Saloovaara, H., Häkkinen, P., & Järvelä, S. (2007). Combining individual and group-level perspectives for studying collaborative knowledge construction in context. *Learning and Instruction*, *17*, 448-459.

Aschersleben, G., Henning, A., & Daum, M. M. (2013). Discontinuities in early development of the understanding of physical causality. *Cognitive Development*, *28*, 31-40.

Asterhan, C. S. C., & Schwarz, B. B. (2009). Argumentation and explanation in conceptual change : Indications from protocol analyses of peer-to-peer dialog. *Cognitive Science*, *33*, 374-400.

Astolfi, J.-P. (1992). Information, connaissance, savoir. In : *L'école pour apprendre* (p. 67-74). Paris : ESF Editeur.

Astolfi, J.-P. (1992/2004). *L'école pour apprendre*. Paris : ESF Editeur.

Astolfi, J.-P. (1997). *L'erreur, un outil pour enseigner*. Paris : ESF Editeur.

Astolfi, J. P. (2002). L'oeil, la main, la tête. *Cahiers pédagogiques*, *469*. Consulté sur http://www.cahiers-pedagogiques.com/L-oeil-la-main-la-tete.html

Astolfi, J.-P. (2008). *La saveur des savoirs*. Paris : ESF Editeur.

Astolfi, J.-P., Cauzinille-Marmèche, E., Giordan, A., Henriques-Christofidès, A., Mathieu, J., & Weil-Barais, A. (1984). *Expérimenter : sur les chemins de l'explications scientifiques*. Toulouse : Editions Privat.

Atkinson, C. (1983, 2006). *Making Sense of Piaget*. London, New York : Routledge.

Bachelard, G. (1938/1972). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Librairie Philosophique J. Vrin.

Baillargeon, R. (2008). Innate ideas revisited : For a principle of persistence in infants' physical reasoning. *Perspectives on psychological sciences*, *3*(1), 2-13.

Baker, M. (1992). An analysis of cooperation and conflict in students collaborative explanations for phenomena in mechanics. In : A. Tiberghien & H. Mandl (Eds.), *Intelligent Learning Environments and Knowledge Acquisition in Physics* (p. 153-179). Berlin : Springer Verlag.

Baker, M. (1993). Dialogic learning : Negotiation and argumentation as mediating mechanisms. *World Conference on Artificial Intelligence and Education*, 4-11.

Baker, M. (2002). Argumentative interactions, discursive operations, and learning to model in science. In : P. Brna, M. Baker, K. Stenning, & A. Tiberghien (Eds.), *The role of communication in learning to model* (p. 303-324). Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Baker, M. (2003). Computer-mediated argumentative interactions for the co-elaboration of scientific notions. In : J. Andriessen, M. Baker, & D. Suthers (Eds.), *Arguing to Learn : Confronting Cognitions in Computer-Supported Collaborative Learning environments* (p. 47-78). Dordrecht, Boston, London : Kluwer Academic Publishers.

Baker, M. (2004). *Recherches sur l'élaboration de connaissances dans le dialogue*. Synthèse pour l'habiliation à diriger les recherches, Université Nancy 2.

Baker, M. (2008). Formes et processus de la résolution coopérative de problèmes : des savoirs aux pratiques éducatives. In : Y. Rouiller & K. Lehraus (Eds.), *Vers des apprentissages en coopération : rencontres et perspectives* (p. 107-130). Berne : Peter Lang.

Baker, M., Andriessen, J., Lund, K., van Amelsvoort, M., & Quignard, M. (2007). Rainbow : A framework for analysing computer-mediated pedagogical debates. *Computer-supported Collaborative Learning*, *2*, 315-317.

Baker, M., De Vries, E., Lund, K., & Quignard, M. (2003). Interactions épistémiques médiatisées par ordinateur pour la co-élaboration des notions scientifiques. In : C. Deaudelin & T. Nault (Eds.), *Apprendre avec des pairs et des TIC : quels environnements pour quels impacts ?* Montréal : Presses de l'Université du Québec.

Baker, M., & Séjourné, A. (2007). L'élaboration des connaissances chez les élèves dans un débat médiatisé par ordinateur. In : A. Specogna (Ed.), *Enseigner dans l'interaction* (p. 81-111). Nancy : Presses Universitaires de Nancy.

Baldwin, J. M. (1895). *Mental development in the child and the race : Methods and processes*. New York : Macmillan.

Barrelet, J.-M., & Perret-Clermont, A.-N. (1996). *Jean Piaget et Neuchâtel : l'apprenti et le savant*. Lausanne : Payot.

Bateson, G. (1980). *Vers un écologie de l'esprit*. Paris : Editions du Seuil.

Bautier, E. (2015). Quand la complexité des supports d'apprentissage fait obstacle à la compréhension de tous les élèves. *Spirale - Revue de Recherches en Éducation*, *55*, 11-20.

Bautier, E., & Rayou, P. (2009). *Les inégalités d'apprentissage : programmes, pratiques et malentendus scolaires*. Paris : Presses Universitaire de France.

Bautier, E., & Rochex, J.-Y. (1997). Ces malentendus qui font les différences. In : J.-P. Terrail (Ed.), *La scolarisation de la France, Critique de l'état des lieux* (pp. 105–122). Paris, La Dispute.

Bazzanella, C., & Damiano, R. (1999). The interactional handling of misunderstanding in everyday conversations. *Journal of Pragmatics*, *31*, 817-836.

Beck, H. (1993). Comment le physicien voit la réalité. *Bulletin du Centre d'études hégéliennes et dialectiques*, *19*(64), 1-18.

Becker, H. S. (2016). *La bonne focale*. Paris : La Découverte.

Bell, N. (1991). Une perspective psychosociale sur la métacognition. *Aster*, *12*, 7-27.

Bental, D., Tiberghien, A., Baker, M., & Megalagaki, O. (1995). Analyse et modélisation de l'apprentissage des notions de l'énergie dans l'environnement "chene". In : D. Guin, J.-F. Nicaud, & D. Py (Eds.), *Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur* (p. 137-148). Paris : Eyrolles.

Berger, P. L., & Luckmann, T. (1966). *The Social Construction of Reality*. Garden City, New York : Doubleday & Company, Anchor Books.

Bergman, L. R. (2009). Mediation and causality at the individual level. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *43*(3), 248-252.

Bernard, F.-X., Weil-Barais, A., & Caillot, M. (2006). Les jeunes enfants peuvent-ils acquérir des connaissances sur le monde physique en utilisant un simulateur ? *Aster*, *43*, 17-34.

Bertalanffy, L. v. (1973). *Théorie générale des systèmes*. Paris : Dunod.

Besson, U. (2005). Causalité et explications dans la physique enseignée et dans la pensée commune : calculer et comprendre. In : *Quatrièmes rencontres de l'ARDIST, Lyon 12 - 15 octobre 2005.*

Blanche-Benveniste, C. (1997). *Approches de la langue parlée en français*. Paris : Ophrys.

Bliss, J., & Weil-Barais, A. (1990). Physical sciences and the school curriculum. *European Journal of Psychology of Education*, *V*(4), 371-378.

Bloom, B. S. (1956). *Education Objective Handbook 1 : Cognitive Domain*. New York, USA : David Mc Kay Co, Inc.

Boilevin, J. M. (2005). Enseigner la physique par situation problème ou par problème ouvert. *ASTER*, *40*, 15-37.

Bonnéry, S. (Ed.). (2015). *Supports pédagogiques et inégalités scolaires. Études sociologiques*. Paris : La Dispute.

Bonnéry, S., Crinonand, J., & Simons, G. (2015). Supports et pratiques d'enseignement : quels risques d'inégalités ? *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 3-10. Consulté sur http://www.persee.fr/issue/spira_0994-3722_2015_num_55_1

Borel, M.-J. (1979). La proposition et l'énoncé : note sur l'analyse fregéenne de la signification. *Revue européenne des sciences sociales*, *2*(45), 49-90.

Borel, M.-J., Grize, J.-B., & Miéville, D. (1992). *Essai de logique naturelle*. Berne : Peter Lang.

Bosco, F. M., Bucciarelli, M., & Bara, B. G. (2006). Recognition and repair of communicative failures : A developmental perspective. *Journal of Pragmatics*, *38*, 1398–1429.

Boulind, H. F. (1974). *Ondes ou particules*. Paris : Librairie Vuibert.

Bourdieu, P. (1972/1984). L'opinion publique n'existe pas. In : *Questions de sociologie* (p. 222-235). Paris : Les Éditions de Minuit.

Bourdieu, P., & Passeron, J.-C. (1970). *La reproduction. Eléments pour une théorie du système d'enseignement*. Paris : Minuit.

Bourdieu, P., Passeron, J.-C., & de Saint-Martin, M. (1965). *Rapport pédagogique et communication*. Paris : Mouton & Co, The Hague and Ecole Pratique des Hautes Etudes.

Bourdieu, P., Passeron, J.-C., & De Saint Martin, M. (1994). *Academic Discourse : Linguistic Misunderstanding and Professorial Power*. Standford : Stanford University Press.

Bousquet, S. (1996). Malentendus en situation d'enseignement / apprentissage. *Les Carnets du Cediscor*, *4*, 1.53. Consulté sur http://cediscor.revues.org/414

Brassac, C., & Grégori, N. (2003). Etude clinique d'une activité collaborative : La conception d'un artefact. *Le Travail Humain*, *66*(2), 101-127.

Breux, S., & Perret-Clermont, A.-N. (2014). Etre élève et exprimer une pensée propre : un paradoxe ? In : M. Avanzi, V. Conti, G. Corminboeuf, F. Gachet, L. A. Johnsen, & P. Montchaud (Eds.), *Enseignement du français : les apports de la recherche en linguistique* (p. 327-340). Bruxelles : Peter Lang.

Brna, P., Baker, M., Stenning, K., & Tiberghien, A. (2002). *The role of communication in learning to model*. Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Bronckart, J.-P. (1985). *Le fonctionnement des discours*. Neuchâtel, Paris : Delachaux et Niestlé.

Bronckart, J.-P. (1999). La conscience comme "analyseur" des épistémologies de vygotksi et piaget. In : Y. Clot (Ed.), *Avec Vygotski* (p. 17-43). Paris : La Dispute.

Bronckart, J.-P., & Bota, C. (2011). *Bakhtine démasqué. Histoire d'un menteur, d'une escroquerie et d'un délire collectif*. Genève : Droz.

Bronckart, J.-P., Kilcher, H., & Papandropoulou, I. (1976). Les conduites sémiotiques. In : *Manuel de Psychologie* (p. 281-320). Bruxelles : Dessart et Mardaga.

Broughton, J. M., & Freeman, D. J. (Eds.). (1982). *The Cognitive Developmental Psychology of James Mark Baldwin*. Norwood : Ablex Publishing Corporation.

Brousseau, G. (1983). D'un problème à l'étude a priori d'une situation didactique. In : Olivet (Ed.), *Actes de la deuxième école d'été de Didactique des mathématiques* (p. 39-60). IREM d'Orléans.

Brousseau, G. (1998/2004). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble : La Pensée Sauvage.

Brown, A. L. (1992). Design experiment : Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The Journal of the Learning Sciences*, *2*(2), 141–178.

Bruner, J. (1973). Quelques éléments de la découverte. In : L. S. Shulman & E. R. Keislar (Eds.), *La pédagogie par la découverte* (p. 92-100). Paris : ESF Editeur.

Bruner, J. (1983). *Le développement de l'enfant : savoir faire, savoir dire*. Paris : Presses Universitaires de France.

Bruner, J. (1986/2000). *Culture et modes de pensée (Actual minds, possible worlds)*. Paris : Retz.

Bruner, J. (1990). *Acts of Meaning*. Cambridge, London : Harvard University Press.

Bruner, J. (1991a). *Car la culture donne forme à l'esprit : de la révolution cognitive à la psychologie culturelle*. Paris : Eshel.

Bruner, J. (1991b). The narrative construction of reality. *Critical Inquiry*, *18*(1), 1-20.

Bruner, J. (1996). Frames for thinking : ways of making meaning. In : D.-R. Olson & N. Torrance (Eds.), *Modes of thought : Exploration in culture and cognition* (p. 93-105). New York : Cambridge University Press.

Brunet, R., Ferras, R., & Théry, H. (Eds.). (1992/1993). *Les mots de la géographie : dictionnaire critique*. Paris : Reclus.

Bucheton, D., Brunet, L.-M., Dupuy, C., & Soulé, Y. (2008). Voyage au centre du métier. le modèle des gestes professionnels des enseignants et leurs ajustements. In : D. Bucheton & O. Dezutter (Eds.), *Le développement des gestes professionnels dans l'enseignement du français* (p. 35-59). Bruxelles : De Boeck Supérieur.

Buchs, C., & Butera, F. (2004). Socio-cognitive conflict and the role of student interaction in learning. *New Review of social Psychology*, *3*(1-2), 80-87.

Bulf, C. (2016). Étude didactique des gestes professionnels d'un enseignant débutant en formation. *Recherches en didactiques*, *2*(22), 43-64.

Bunge, M., Halbwachs, F., Kuhn, T. S., Piaget, J., & Rosenfeld, L. (1971). *Les théories de la causalité*. Paris : Presses Universitaires de France.

Burman, E. (2008). *Deconstructing Developmental Psychology*. London : Routledge.

Busino, G. (1987). Lecture de grize. *Revue européenne des sciences sociales*, *25*(77), 19-30.

Busino, G. (1997). Entre le culturalisme, le sociologisme et le relativisme. In : D. Miéville & A. Berrendonner (Eds.), *Logique, discours et pensée. Mélanges offerts à Jean-Blaise Grize.* (p. 325-344). Berne : Peter Lang.

Butera, F., Buchs, C., & Daron, C. (Eds.). (2011). *L'évaluation, une menace ?* Paris : Presses Universitaires de France.

Butera, F., & Mugny, G. (2001). Conflicts and social influences in hypothesis testing. In : C. de Dreu & N. De Vries (Eds.), *Group consensus and minority influence : implications for innovation* (p. 160-182). Malden : Blackwell Publishing.

Buty, C., & Plantin, C. (2008). *Argumenter en classe de sciences. Du débat à l'apprentissage.* Lyon : INRP.

Bécu-Robinault, K. (2015). *Un cadre epistemo-semiotique pour concevoir des séances et analyser des pratiques d'etude et d'enseignement de la physique*. Note de synthèse pour l'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Universite de Toulouse.

Béguin, P. (2005). La simulation entre experts : double jeu dans la zone proximale de développement. In : P. Pastré (Ed.), *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels.* Toulouse : Octarès Editions.

Béguin, P., & Clot, Y. (2004). L'action située dans le développement de l'activité. *@ctivités*, *1*(2), 27–49.

Bélanger, N. D., & Desrochers, S. (2001). Can 6-month-old infants process causality in different types of causal events ? *British Journal of Developmental Psychology*, *19*, 11-21.

Cabell, K. R., & Valsiner, J. (Eds.). (2014). *The Catalyzing Mind. Beyond Models of Causality* (Vol. 11). Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Campbell, R. L. (2019). What piaget brought (and failed to bring) to royaumont. *Paradigmi : Rivista di Critica Filosofica*, *37*(1), 73-100. doi: 10.30460/92846

Campos, M. N. (2010). La schématisation dans des contextes en réseaux. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *68*, 215-258.

Campos, M. N. (2017). *Navegar é Preciso, Comunicar é Impreciso*. Marca : Edusp.

Canelas-Trevisi, S., Guernier, M.-C., Cordeiro, G. S., & Simon, D.-L. (Eds.). (2009). *Langage, objets enseignés et travail enseignant*. Grenoble : ELLUG.

Carey, S. (1985). *Conceptual Change in Childhood*. Cambridge, MA : MIT Press.

Carey, S. (1991). Knowledge acquisition : Enrichment or conceptual change ? In : S. Carey & R. Gelman (Eds.), *The Epigenesis of Mind : Essays on Biology and Cognition* (p. 257-291). Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Carey, S. (1992). The origin and evolution of everyday concepts. In : R. N. Giere (Ed.), *Cognitive Models of Science* (p. 89-127). Minneapolis : Minnesota Center for the Philosophy of Science.

Carey, S. (2009). *The Origin of Concepts*. Oxford, UK : Oxford University Press.

Cariou, D., Kervran, M., & Rilhac, P. (2015). Malentendus et dysfonctionnements du jeu didactique à l'école primaire : la notion de "jeu alternatif". *Revue Française de Pédagogie*, *190*, 75-88.

Caron, J. (1983). *Les régulations du discours*. Paris : Presses Universitaires de France.

Carraher, D. W., & Schliemann, A. D. (2002). The transfer dilemma. *The Journal of the Learning Sciences*, *11*(1), 1-24.

Carraher, T. N., Carraher, D. W., & Schliemann, A. D. (1985). Mathematics in the streets and in schools. *British Journal of Developmental Psychology*, *3*, 21-29.

Carugati, F. (1999). From piaget and vygotsky to learning activities : a long journey and an inescapable issue. In : M. Hedegaard & J. Lompscher (Eds.), *Learning Activity and Development* (pp. 211–234). Aarhus : Aarhus University Press.

Carugati, F., De Paolis, P., & Mugny, G. (1979). A paradigm for the study of social interaction in cognitive development. *Italian Journal of Psychology*, *6*, 147–155.

Carugati, F., & Perret-Clermont, A. N. (2015). Learning and instruction, social-cognitive perspectives. In : J. D. Wright (Ed.), *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences, 2nd edition* (Vol. 13, p. 670–676). Oxford : Elsevier.

Cauzinille-Marmèche, E., Mathieu, J., & Weil-Barais, A. (1983/1985). *Les savants en herbe*. Berne : Peter Lang.

Chapleau, N., Saidane, K. B.-B. R., & Fejzo, A. (2016). Portrait des connaissances et des capacités de conscience morphologique d'élèves présentant des difficultés d'apprentissage en orthographe lexicale. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, *4*(76), 85-99.

Charpak, G. (1996). *La main à la pâte : Les sciences à l'école primaire*. Mayenne : Floch.

Charpak, G. (1998). *Enfants, chercheurs et citoyens*. Paris : Editions Odile Jacob.

Charpak, G., Léna, P., & Quéré, Y. (2005). *L'enfant et la science : l'aventure de la main à la pâte*. Paris : Editions Odile Jacob.

Chavaz, M. (1993). Logique et relations : vers un traitement des relations prédicatives. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *61*, 9-51.

Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique : du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble : Pensée sauvage.

Chi, M. T. H. (2000). Self-explaining expository texts : The dual processes of generating inferences and repairing mental models. In : R. Glaser (Ed.), *Advances in Instructional Psychology* (p. 161-238). Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Clark, A. (2008). *Supersizing The Mind : Embodiment, Action, and Cognitive Extension*. Oxford : Oxford University Press.

Clark, A., & Chalmers, D. J. (1998). The extended mind. *Analysis*(58), 7-19.

Clark, D. B. (2006). Longitudinal conceptual change in students' understanding of thermal equilibrium : An examination of the process of conceptual restructuring. *Cognition and Instruction*(24), 467-563.

Clot, Y. (Ed.). (1999). *Avec Vygotski*. Paris : La Dispute.

Clot, Y. (2001). Psychopathologie du travail et clinique de l'activité. *Education permanente*, *146*, 35-51.

Clot, Y. (2004). Action et connaissance en clinique de l'activité. *@ctivités*, *1*(1), 23-33.

Clot, Y., & Faïta, D. (2000). Genres et styles en analyse du travail : Concepts et méthodes. *Travailler*, *4*, 7-42.

Clot, Y., Faïta, D., Fernandez, G., & Scheller, L. (2000). Entretiens en autoconfrontation croisée : une méthode en clinique de l'activité. *Pistes*, *2*(1), 1-7.

Clémence, A. (1991). Les théories de la dissonance cognitive. *Information sur les sciences sociales*, *30*(1), 55–79.

Clément, F. (1997). Du bon usage de la psychologie en philosophie. *Critique*, *599*, 227–246.

Cobb, P. (1999). Conducting teaching experiments in collaboration with teachers. In : A. E. Kelly & R. Lesh (Eds.), *Handbook of Research Design in Mathematics and Science Education* (p. 307-33). Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Cole, M. (1995). From cross-cultural to cultural psychology. *Swiss Journal of Psychology*, *54*(4), 262-276.

Cole, M., Gay, J., Sharp, D., & Glick, J. (1971). *The cultural context of learning and thinking an exploration in experimental anthropology*. New-York : New York : Basic Books, inc.

Cole, M., & Valsiner, J. (2005). Actualizing potentials : Learning through psychology's recurrent crisis. In : D. B. Pillemer & S. H. White (Eds.), *Developmental Psychology and Social Change : Research, History and Policy* (p. 288-313). New York : Cambridge University Press.

Collet, G. (2000). *Langage et modélisation scientifique : le verbe, levier de l'apprentissage*. Paris : CNRS Editions.

Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie, C. R. M. (Ed.). (1985). *Formulaires & Tables*. Genève : Editions du Tricorne.

Connelly, F. M., Finegold, M., Clipsham, J., & Wahlstrom, M. (1977). *Scientific enquiry and the teaching of science : Pattern of enquiry project*. Toronto, Ontario : OISE Press.

Cooren, F. (2018). Edda weigand (ed.) 2017 the routledge handbook of language and dialogue. new york and london : routledge. *Language and Dialogue*, *8*(3), 468-482.

Coppens, N. (2007). Le suivi des conceptions des lycéens en mécanique : développement et usages d'exercices informatisés. *Thèse de doctorat présentée à l'Université Paris-Diderot - Paris VII*.

Coradi, M., Denzler, S., Grossenbacher, S., & Vanhooydonck, S. (2003). *Keine Lust auf Mathe, Physik, Technik ?* (Trendbericht N° 6). Aarau : Schweizer Koordinationsstelle für Bildungsforschung (SKBF-CSRE).

Corsaro, W. A. (1990). The underlife of the nursery school : Young children's social representations of adult rules. In : G. Duveen & B. Lloyd (Eds.), *Social representations and the development of knowledge* (p. 11-26). New York, NY, US : Cambridge University Press.

Courtillot, D., & Ruffenach, M. (2006). *Enseigner les sciences physiques : de la 3e à la Terminale*. Paris : Bordas.

Cousins, S. D. (2014). The semiotic coevolution of mind and culture. *Culture & Psychology*, *20*, 160–191.

Couture, C. (2005). Repenser l'apprentissage et l'enseignement des sciences à l'école primaire. *Revue des Sciences de l'Education*, *31*(2), 317-333.

Crowley, K., & Schunn, C. D. (Eds.). (2001). *Designing for Science*. Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Dafermos, M. (2018). Relating dialogue and dialectics : a philosophical perspective. *Dialogic Pedagogy : An International Online Journal*. Consulté sur http://dpj.pitt.edu doi: 10.5195/dpj.2018.189

Danks, D. (2007). The psychology of causal perception and reasoning. In : H. Beebee, C. Hitchcock, & P. Menzies (Eds.), *Oxford handbook of causation*. Oxford : Oxford University Press.

Dascal, M. (Ed.). (1985). *Dialogue : An Interdisciplinary Approach*. Amsterdam / Philadelphia : John Benjamis Publishing Company.

Dascal, M. (1999). Introduction : Some questions about misunderstanding. *Journal of Pragmatics*, *31*, 753-762.

Da Silva, V. A. (2004). *Savoirs quotidiens et savoirs scientifiques : L'élève entre deux mondes*. Paris : Editions Economica.

Debord, G. (1957/2000). *Rapport sur la construction des situations*. Paris : Éditions Mille et une nuits.

Dee-Lucas, D., & Larkin, J. H. (1991). Equations in scientific proofs : Effects on comprehension. *American Educational Research Journal*, *28*(3), 661-682.

de Fornel, M., & Quéré, L. (1999). *La logique des situations*. Paris : Éditions de l'École des Hautes Études en sciences sociales.

De Jong, T., & Van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, *68*, 179-200.

Deleau, M. (1999). Vygostki, wallon et les débats actuels sur la théorie de la pensée. In : Y. Clot (Ed.), *Avec Vygotski*. Paris : La Dispute.

Delorme, A. (1982). L'influence des facteurs motivationnels : la théorie de bruner. In : *Psychologie de la perception* (p. 92-94). Montréal : Editions Etudes Vivantes.

Den Hartigh, R. J. R., Van Dijk, M. W. G., Steenbeek, H. W., & Van Geert, P. L. C. (2016). A dynamic network model to explain the development of excellent human performance. *Frontiers in Psychology*, *7*, 532. Consulté sur https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2016.00532 doi: 10.3389/fpsyg.2016.00532

Denis-Prinzhorn, M., & Grize, J.-B. (1966). La méthode clinique en pédagogie. In : J. Piaget (Ed.), *Psychologie et épistémologie génétiques* (p. 319-325). Paris : Dunod.

Deparis, V. (2013, avril). La découverte historique de la variation de la pesanteur avec la latitude. *Planet-Terre*. Consulté sur http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/pendule-pesanteur-latitude.xml

Deschamps, J.-C., & Clémence, A. (1990). *L'attribution : causalité et explication au quotidien*. Lausanne : Delachaux et Niestlé.

Desclés, J.-P. (1997). Schèmes, notions, prédicats et termes. In : D. Miéville & A. Berrendonner (Eds.), *Logique, discours et pensée. Mélanges offerts à Jean-Blaise Grize.* (p. 9-36). Berne : Peter Lang.

Desrochers, S. (1999). Infants' processing of causal and noncausal events at 3.5 months of age. *The Journal of Genetic Psychology*, *160*(3), 294-302.

Desrochers, S. (2003). Les balbutiements de la causalité chez le nourrisson : Piaget "accommodé". *Archives de psychologie*, *70*(2), 97-119.

Desrochers, S. (2005). La causalité physique chez l'enfant : faut-il abandonner les idées de piaget ? *Archives de psychologie*, *71*, 25-47.

De Vecchi, G., & Carmona-Magnaldi, N. (2002). *Faire vivre de véritables situations-problèmes*. Paris : Hachette.

Devi, R., Tiberghien, A., Baker, M., & Brna, P. (1996). Modelling students' construction of energy models in physics. *Instructional Science*, *24*, 259-293.

de Vries, E., Lund, K., & Baker, M. (2002). Computer-mediated epistemic dialogue : Explanation and argumentation as vehicles for understanding scientific notions. *The Journal of the Learning Sciences*, *11*(1), 63-103.

Dewey, J. (1938). *Experience and Education*. Indianapolis : Kappa Delta Pi.

Dewey, J. (1938/1993). *Logique. La théorie de l'enquête* (G. Deledalle, Trad.). Paris : Presses Universitaires de France.

Dinello, R., & Perret-Clermont, A. N. (1987). *Psychopédagogie interculturelle*. Cousset : Delval.

diSessa, A. A. (1993a). Between brain and behavior : Response to marton. *Cognition and Instruction*, *10*(2 & 3), 261-280.

diSessa, A. A. (1993b). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, *10*(2 & 3), 105-225.

diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research. In : R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (p. 265-281). New York : Cambridge University Press.

diSessa, A. A., Gillespie, N. M., & Esterly, J. B. (2004). Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force. *Cognitive Science*, *28*, 843-900.

diSessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change ? *International Journal of Science Education*, *20*, 1155-1191.

Doise, W. (1976). *L'articulation psychologique et les relations entre groupes.* Bruxelles : De Boeck.

Doise, W. (1982). *L'explication en psychologie sociale.* Paris : Presses universitaires de France.

Doise, W., Mugny, G., & Perret-Clermont, A.-N. (1975). Social interaction and the development of cognitive operations. *European Journal of Social Psychology*, *5*(3), 367-383.

Donovan, M. S., & Bransford, J. D. (2005). *How students learn science in the classroom*. Washington, D.C : The National Academies Press.

Donovan, M. S., Bransford, J. D., & Pellegrino, J. W. (Eds.). (2000). *How People Learn*. Washington D.C. : National Academy Press.

Dontaine, M. (2015). Utilisation de séquences vidéo pour la mise en évidence du raisonnement causal en physique. *Éducation & Didactique*, *9*(2), 95-106.

Douady, R. (1984). *Jeux de cadres et dialectique outil-objet dans l'enseignement des mathématiques*. Thèse de doctorat, Université Paris VII.

Douaire, J. (2004). *Argumentation et disciplines scolaires*. Condé-sur-Noireau : INRP.

Driver, R. (1973). *The representation of conceptual frameworks in young adolescent science students*. PhD thesis, University of Illinois.

Driver, R., Guesne, E., & Tiberghien, A. (1985). *Children's ideas in science*. Philadelphia : Open University Press, Milton Keynes.

Driver, R., Leach, J., Millar, R., & Scott, P. (1996). *Young people's images of science*. Buckingham : Open University Press.

Driver, R., Leach, J., Scott, P., & Wood-Robinson, C. (1994). Young peolple's understanding of science concepts : implications of cross-age studies for curriculum planning. *Studies in Science Education*, *24*(1), 75-100.

Driver, R., Newton, P., & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education*, *84*(3), 287-312.

Dubois, N. (1994/2009). *La norme d'internalité et le libéralisme*. Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.

Dumez, H. (2011). Qu'est-ce que la recherche qualitative ? *Le Libellio d' AEGIS*, *7*(4), 47-58.

Dykstra, D., Boyle, C. F., & Monarch, I. A. (1992). Studying conceptual change in learning physics. *Science Education*, *76*(6), 615-652.

Edwards, D. (1993). But what do children really think ? : Discourse analysis and conceptual content in children's talk. *Cognition and Instruction*, *11*(3 & 4), 207-225.

Eemeren, F. H. v. (2003). A glance behind the scenes : the state of the art in the study of argumentation. *Studies in Communication Sciences*, *3*(1), 1-23.

Eemeren, F. H. v., Garssen, B., Krabbe, E. C. W., Henkemans, F. A. S., Verhei, B., & Wagemans, J. H. M. (2014). *Handbook of Argumentation Theory*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Eemeren, F. H. v., & Grootendorst, R. (2004). *A systematic theory of argumentation : the pragma-dialectical approach*. Cambridge, New York : Cambridge University Press.

Engeström, Y. (1987). *Learning By Expanding : An Activity-theoretical Approach To Developmental Research*. Helsinki : Orienta-Konsultit Oy.

Ennis, R. (1976). An alternative to piaget's conceptualization of logical competence. *Child Development*, *47*, 903-919.

Erduran, S., & Jiménez-Aleixandre, M. P. (Eds.). (2008). *Argumentation in Science Education*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Esfeld, M. (2007). Mental causation and the metaphysics of causation. *Erkenntnis*, *67*, 207-220. doi: 10.1007/s10670-007-9065-y

Eurydice. (2006). *L'enseignement des sciences dans les établissements scolaires en Europe. Etat des lieux des politiques et de la recherche* (Rapport technique). Eurydice, Bruxelles.

Fabre, M. (2011). *Éduquer pour un monde problématique : La carte et la boussole*. Paris : Presses Universitaires de France.

Fabre, M., & Musquer, A. (2009). Comment aider l'élève à problématiser ? les inducteurs de problématisation. *les sciences de l'éducation - pour l'ère nouvelle*, 111-129.

Fabre, M., Weil-Barais, A., & Xypas, C. (Eds.). (2014). *Les problèmes complexes flous en éducation*. Bruxelles : De Boeck.

Falomir, G., J. M. & Mugny. (2004). *Société contre fumeur. Une analyse psychosociale de l'influence des experts*. Grenoble : Presses Universitaires.

Ferrari, M. (2007). Examining triangle metaphors : Utility in developmental theory and scientific application. *Human Development*, *50*, 234-240.

Festinger, L. (1957). *A Theory of Cognitive Dissonance*. Standford : Stanford University Press.

Filliettaz, L. (2006). La place du contexte dans une approche praxéologique du discours. le cas de l'argumentation dans les interactions sociales. *Pratiques*, *129/130*, 71-88.

FitzGerald, K., Seale, N. S., Kerins, C. A., & McElvaney, R. (2008). The critical incident technique : A useful tool for conducting qualitative research. *Journal of Dental Education*, *72*(3), 299-304.

Flanagan, J. C. (1954). The critical incident technique. *Psychological Bulletin*, *21*(4), 327-358.

Fleer, M. (2012). Critical reflections on contemporary sociocultural and activity issues conversation with andy blunden. *ISCAR News*, *9*(3), 2-4.

Ford, M. J. (2012). A dialogic account of sense-making in scientific : Argumentation and reasoning. *Cognition And Instruction*, *30*(3), 207-245.

Forget, A., & Schubauer-Leoni, M. L. (2008). Inventer un code de désignation d'objets au début de la forme scolaire : des productions personnelles à la convention collective. In : L. Filliettaz & M.-L. Schubauer-Leoni (Eds.), *Processus interactionnels et situations éducatives* (p. 183-204). Bruxelles : De Boeck Université.

Freudenthal, H. (1973). *Mathematics as an Educational Task*. Dordrecht : Reidel.

Gabbay, D. M., Johnson, R. H., Ohlbach, H. J., & Woods, J. (Eds.). (2002). *Handbook of the Logic of Argument and Inference : The turn towards the practical* (Vol. 1). Amsterdam : Elsevier.

Gagnon, M. (1975). Une analyse sémantique du concept de causalité est-elle possible ? *Philosophiques*, *2*(2), 187-205.

Gaigher, E., Rogan, J. M., & Braun, M. W. (2007). Exploring the development of conceptual understanding through structured problem-solving in physics. *international journal of Science Education*, *9*(2), 1089-1110.

Galantucci, B., & Roberts, G. (2014). Do we notice when communication goes awry ? an investigation of people's sensitivity to coherence in spontaneous conversation. *PLOS ONE*, *9*(7). Consulté sur www.plosone.orgwww.plosone.orgwww.plosone.orgwww.plosone.org

Gardner, H. (1979). Developmental psychology after piaget : An approach in terms of symbolization. *Human Development*, *22*, 73-88.

Garduño, T. (1998). La genèse d'une innovation pédagogique. *Dossiers de Psychologie, Université de Neuchâtel*, *51*, 1-404.

Garfinkel, H. (1967). *Studies in Ethnomethodology*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.

Garnier, C., Bernarz, N., & Ulanovskaya, I. (Eds.). (1991). *Après Vygotski et Piaget : perspectives sociale et constructiviste*. Bruxelles : De Boeck.

Gattico, E. (1993). Schématisation et logique naturelle : développements et changements de certains thèmes piagétiens. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *61*, 97-137.

Gattico, E. (1997). Epistemologia genetica e logica del discorso. In : D. Miéville & A. Berrendonner (Eds.), *Logique, discours et pensée. Mélanges offerts à Jean-Blaise Grize.* (p. 359-380). Berne : Peter Lang.

Gattico, E. (2010). Un'epistemologia della logica naturale per conoscere la conoscenza. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *68*, 259-295.

Gendler, T. S. (1998). Galileo and the indispensability of scientific thought experiment. *British Journal of Philosophy of Science*, *49*(3), 397-424.

George, C. (1980). Attention et traitement de l'information dans l'apprentissage instrumental humain. *L'année psychologique*, *80*(2), 481-500. Consulté sur http://www.persee.fr/doc/psy_0003-5033_1980_num_80_2_28334 doi: 10.3406/psy.1980.28334

Ghiglione, R., & Richard, J. (1999). Explication causale et normativité. In : R. Ghiglione & J. Richard (Eds.), *Cours de psychologie* (p. 167-191). Paris : Dunod.

Ghiglione, R., & Trognon, A. (1993). *Où va la pragmatique ?* Grenoble : Presses universitaires de Grenoble.

Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. In : R. E. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, Acting, and Knowing* (p. 67-82). Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Gibson, J. J. (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Hillsdale, New Jersey : Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Giere, R. N. (2006). *Scientific Perspectivism*. Chicago : The Chicago University Press.

Gigerenzer, G. (1997). Bounded rationality : Models of fast and frugal inference. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, *133*(2), 201-218.

Giglio, M., Boissonnade, R., & Kohler, A. (2017). Les gestes de l'enseignant visant un apprentissage autorégulé de la collaboration créative en classe. In : S. C. Cartier & L. M. Lopez (Eds.), *Soutien à l'apprentissage autorégulé en contexte scolaire. Perspectives francophones* (p. 117-135). Montréal : Presses de l'Université du Québec.

Gilbert, J. K. (2013). Representations and models. In : R. Tytler, V. Prain, P. Hubber, & B. Waldrip (Eds.), *Constructing Representations to Learn in Science* (p. 193-198). Rotterdam, Boston, Taipei : Sense Publishers.

Gillespie, A., & Cornish, F. (2014). Sensitizing questions : A method to facilitate analyzing the meaning of an utterance. *Integrative Psychological Behavioral Science*, *48*(4), 435-452.

Gilliéron, E. (1983). *Aux confins de la psychanalyse*. Paris : Payot.

Gilly, M., Roux, J., & Trognon, A. (Eds.). (1999). *Apprendre dans l'interaction.* Nancy : Presses Universitaires de Nancy ; Aix-En-Provence : Publications de l'université de Provence.

Giordan, A. (1983). *L'élève et/ou les connaissances scientifiques : approche didactique de la construction des concepts scientifiques par les élèves*. Berne : Peter Lang.

Giordan, A., & de Vecchi, G. (1990). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Lausanne, Paris : Delachaux et Niestlé.

Giordan, A., & Girault, Y. (1994). *Les aspects qualitatifs de l'enseignement des sciences dans les pays francophones* (Rapport technique). UNESCO : Institut International de planification de l'éducation.

Giordan, A., Girault, Y., & Clément, P. (1994). *Conceptions et connaissances*. Berne : Peter Lang.

Goffman, E. (1964). The neglected situation. *American Anthropologist*, *66*(6), 133-136.

Goldstone, R. L., & Son, J. Y. (2005). The transfer of scientific principles using concrete and idealized simulations. *The Journal of the Learning Sciences*, *14*(1), 69-110.

Goswami, U. (Ed.). (2002). *Blackwell Handbook of Childhood Cognitive Development*. Oxford, Cambridge : Blackwell Publishers.

Greco Morasso, S. (2011). *Argumentation in dispute mediation. A reasonable way to solve conflict*. Amsterdam Philadelphia : Philadelphia : John Benjamins.

Greco Morasso, S., Mehmeti, T., & Perret-Clermont, A. N. (2016). Getting involved in an argumentation in class as a pragmatic move : social conditions and affordances. In : D. Mohammed & M. Lewinski (Eds.), *Argumentation and Reasoned Action : Proceedings of the First European Conference on Argumentation.* (Vol. II, p. 463-478). London : College Publications.

Greco Morasso, S., Miserez-Caperos, C., & Perret-Clermont, A.-N. (2015). L'argumentation à visée cognitive chez les enfants. une étude exploratoire sur les dynamiques argumentatives et psychosociales. In : N. Muller Mirza & C. Buty (Eds.), *L'argumentation dans les contextes de l'éducation* (p. 39-82). Berne : Peter Lang.

Greeno, J. G., & van de Sande, C. (2007). Perspectival understanding of conceptions and conceptual growth in interaction. *Educational Psychologist*, *42*(1), 9-23. doi: 10.1080/00461520709336915

Grice, H. P. (1979). Logique et conversation. *Communications*, *30*(1), 57-72.

Grize, J.-B. (1979). Logique du discours et institutions sociales. *Revue européenne des sciences sociales*, *2*(45), 91-101.

Grize, J.-B. (1981). Logique naturelle et explication. *Revue européenne des sciences sociales*, *3*(56), 7-14.

Grize, J.-B. (1982). *De la logique à l'argumentation*. Genève : Librairie Droz S.A.

Grize, J.-B. (1987). Logique naturelle et vraisemblance. *Intellectica*, *1*(4), 41-54.

Grize, J.-B. (1989). Signification et contradiction. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *57*, 103-119.

Grize, J.-B. (1990). *Logique et langage*. Paris : Ophrys.

Grize, J.-B. (1993). Logique naturelle et représentations sociales. *Paper on Social Representations - Textes sur les Représentations Sociales*, *2*(3), 1-159.

Grize, J.-B. (1994). Logique naturelle et sociologie. *L'Année sociologique*, *44*, 281-289.

Grize, J.-B. (1995). Argumentation et logique naturelle. convaincre et persuader. *Hermès*, *15*, 263-269.

Grize, J.-B. (1996). *Logique naturelle & communications*. Paris : Presses Universitaires de France.

Grize, J.-B. (1997). Le temps des idées molles. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *65*, 13-23.

Grize, J.-B. (1998). Argumenter, c'est davantage montrer que démontrer. In : A. Borzeix, A. Bouvier, & P. Pharo (Eds.), *Sociologie et connaissance* (p. 197-203). Paris : CNRS Editions.

Grize, J.-B. (2010). Logique, analogie et identité. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *68*, 91-98.

Grize, J.-B., & de Montmollin, M. (2008). *Logique naturelle, analyse du travail, ergonomie*. Toulouse : Octarès Editions.

Grize, J.-B., Pauli, L., & Morf, A. (1970-1972). *Science et pédagogie* (Rapport technique). Centre de recherches Sémiologiques de l'Université de Neuchâtel, Département de Pédagogie de l'Université de Genève, Centre de Recheche en Didactique de l'Université du Québec à Montréal.

Grize, J.-B., & Piérault-Le Bonniec, G. (1983). *La contradiction*. Paris : Presses Universitaires de France.

Grize, J.-B., Vergès, P., & Silem, A. (1987). *Salariés face aux nouvelles technologies.* Paris : Editions du CNRS.

Grossen, M. (1988). *L'intersubjectivité en situation de test*. Cousset : Editions Delval.

Grossen, M. (1999). Approche dialogique des processus de transmission-acquisition de savoirs. une brève introduction. *Actualités psychologiques*, *7*, 1-32.

Grossen, M. (2010). Interaction analysis and psychology : A dialogical perspective. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *44*(1), 1-22.

Grossen, M., & Orvig, A. S. (2011). Dialogism and dialogicality in the study of the self. *Culture & Psychology*, *17*(4), 491-509.

Grossen, M., & Perret-Clermont, A. N. (1992). *L'espace thérapeutique : cadres et contextes*. Neuchâtel, Paris : Delachaux et Niestlé.

Grossen, M., & Perret-Clermont, A.-N. (1997). Learning : a reproduction of institutionalised teaching practices or a personal appropriation ? In : *EARLI symposium "Studying Social Interaction. Ways of Thinking or Ways of Method Discussion. 7th European Conference for research on Learning and Istruction, Athènes.*

Grossen, M., & Salazar Orvig, A. (2006). *L'entretien clinique en pratiques : analyse des interactions verbales d'un genre hétérogène*. Paris : Belin.

Hakkarainen, K., & Paavola, S. (2007). From monological and dialogical to trialogical approaches to learning. In : *International symposium on the Guided Construction of Knowledge in Classrooms.* Jerusalem : Hebrew University.

Halbwachs, F. (1975). La physique du maître entre la physique du physicien et la physique de l'élève. *Revue Française de Pédagogie*, *33*, 19-29.

Halbwachs, F. (1978). Structure de la matière enseignée et développement conceptuel. *Revue française de pédagogie*, *45*, 33-36.

Halbwachs, F., & Bovet, M. (1980). Le poids et la masse en classe de sixième. *Revue Française de Pédagogie*, *53*, 4-18.

Halbwachs, F., & Torunczyk, A. (1985). On galileo's writing on mechanics : An attempt at a semantic analysis of viviani's scholium. *Synthese*, *62*(3), 459-484.

Harari, J. N. (2011/2015). *Sapiens : une brève histoire de l'humanité*. Paris : Albin MIchel.

Harré, R., & Gillett, G. (1994). *The Discursive Mind*. London : Sage Publication.

Hatano, G., & Wertsch, J. V. (2001). Sociocultural approaches to cognitive development : The constitutions of culture in mind. *Human Development*, *44*(2-3), 77-83.

Hermans, H. J. M., & Hermans-Konopka, A. (2010). *Dialogical Self Theory : Positioning and Counter-Positioning in a Globalizing Society.* Cambridge : Cambridge University Press.

Hermans, H. J. M., Kempen, H. J. G., & Loon, R. J. P. V. (1992). The dialogical self : Beyond individualism and rationalism. *American Psychologist*, *47*, 22-33.

Hewstone, M. (1989). Représentations sociales et causalité. In : D. Jodelet (Ed.), *Les représentations sociales* (pp. 252–276). Paris : Presses Universitaires de France.

Hmelo-Silver, C. E., Marathe, S., & Liu, L. (2007). Fish swim, rocks sit, and lungs breathe : expert-novice understanding of complex systems. *The Journal of the Learning Sciences*, *16*(3), 307-331.

Hollan, J., Hutchins, E., & Kirsh, D. (2000). Distributed cognition : toward a new foundation for human-computer interaction research. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*(7), 174-196.

Honneth, A. (2005). Invisibilité : sur l'épistémologie de la « reconnaissance ». *Réseaux*(1), 39-57.

House, J., Kasper, G., & Ross, S. (Eds.). (2003). *Misunderstanding in Social Life*. Harlow : Pearson Education Limited.

Houssaye, J. (1993). La pédagogie : une encyclopédie pour aujourd'hui. In : J. Houssaye (Ed.), (p. 13-24). Paris : ESF Editeur.

Howe, C., Tolmie, A., Greer, K., & Mackenzie, M. (1995). Peer collaboration and conceptual growth in physics : task influence on children's understanding of heating and cooling. *Cognition and Instruction*, *13*(4), 483-503.

Howe, C., Tolmie, A., & Rodgers, C. (1992). The acquisition of conceptual knowledge in science by primary school children : Group interaction and the understanding of motion down an incline. *British Journal of Developmental Psychology*, *10*, 113-130.

Hughes, H., Williamson, K., & Lloyd, A. (2007). Critical incident technique. In : S. Lipu (Ed.), *Exploring methods in information literacy research.* (Vol. Topics in Australasian Library and Information Studies, p. 49-66). Centre for Infromation Studies, Charles Sturt University, Wagga Wagga, N.S.W.

Hundeide, K. (1985). The tacit background of children's judgments. In : J. V. Wertsch (Ed.), *Culture, Communication and Cognition* (p. 306–322). Cambridge, MA : Harvard University Press.

Hundeide, K. (1988). Metacontracts for situational defintions and for presentation of cognitive skills. *The Quarterly Newsletter of the Laboratory of Comparative Human Cognition*, *10*(3), 85-91.

Iannaccone, A., & Perret-Clermont, A.-N. (1993). Qu'est-ce qui s'apprend, qu'est-ce qui se développe ? In : J. Wassmann & P. Dasen (Eds.), *Les savoirs quotidiens, les approches cognitives dans le dialogue interdisciplinaire,* (pp. 235–258). Fribourg : Presses Universitaires de Fribourg.

Inhelder, B. (1962). Some aspects of piaget's genetic approach to cognition. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, *27*(2), 17-31.

Inhelder, B. (1973). Remarques sur les structures élémentaires de la pensée. *Orientation scolaire et professionnelle*, *2*(3), 203-212.

Inhelder, B., Cellerier, G., Ackermann, E., Blanchet, A., Boder, A., de Caprona, D., ... Saada-Robert, M. (1992). *Le cheminement des découvertes chez l'enfant*. Paris & Neuchâtel : Lausanne : Delachaux & Niestlé.

Inhelder, B., & de Caprona, D. (1992). Vers le constructivisme psychologique : structure ? procédures ? les deux indissociables. In : B. Inhelder et al. (Eds.), *Le cheminement des découvertes chez l'enfant* (p. 19-50). Paris & Neuchâtel : Lausanne : Delachaux & Niestlé.

Inhelder, B., & Piaget, J. (1955). *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*. Paris : Presses Universitaires de France. Consulté sur http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/textes/index_extraits_chrono4.php

Inhelder, B., Sinclair, H., & Bovet, M. (1974). *Apprentissage et structures de la connaissance*. Paris : Presses Universitaires de France.

Ioannides, C., & Vosniadou, S. (2002). The changing meaning of force. *Cognitive Science Quarterly*, *2*(1), 5–62.

Ivic, I., Pesikan, A., & Antic, S. (2002). *Active Learning 2. Manual for implementation of active learning / teaching methods* (Rapport technique). UNICEF, Institute of Psychology Belgrade, Ministry of Education and Science of Republic of Montenegro, Ministry of Education and Sports of Republic of Serbia, Beograd.

Jacques, F. (1980). L'explication dans les sciences humaines . In : M. Richelle & X. Seron (Eds.), *L'explication en psychologie* (p. 84-201). Paris : Presses universitaires de France.

Jacques, F. (1985). *L'espace logique de l'interlocution*. Paris : Presses universitaires de France.

Jacques, F. (1988). Trois stratégies interactionnelles : conservation négociation, dialogue. In : C. Kerbrat-Orecchioni (Ed.), *Echanges sur la conversation* (pp. 45–68). Edition du CNRS, Paris.

Jalley, E. (2006). *Wallon et Piaget : Pour une critique de la psychologie contemporaine*. Paris : L'Harmattan.

Jankélévitch, V. (1957). *Le je-ne-sais-quoi et le presque-rien*. Paris : Presses Universitaires de France.

Jobert, G. (2014). *Exister au travail. Les hommes du nucléaire.* Toulouse : Editions Érès.

Jodelet, D. (1989). *Folies et représentations sociales*. Paris : Presses Universitaires de France.

Jodelet, D. (Ed.). (1989/2003). *Les représentations sociales*. Paris : Presses Universitaires de France.

Johnson-Laird, P. N. (2006). *How We Reason*. Oxford : Oxford University Press.

Johsua, M.-A., & Johsua, S. (1988). Les fondements didactiques de l'expérimental dans l'enseignement scientifique (première partie). *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *8*(3), 231-266.

Joshua, S., & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : Presses Universitaires de France.

Kant, E. (1790/1984). *Critique de la faculté de juger*. Paris : J. Vrin.

Kant, E. (1993/1787). *Critique de la raison pure*. Paris : Quadrige / Presses Universitaires de France.

Karlgren, K., & Ramberg, R. (2012). The use of design patterns in overcoming misunderstandings in collaborative interaction design. *CoDesign : International Journal of CoCreation in Design and the Arts*, *8*(4), 231-246.

Kerbrat-Orecchioni, C. (1990). *Les interaction verbales*. Paris : Armand Colin.

Kistler, M. (1999). *Causalité et lois de la nature*. Paris : Librairie philosophique J. Vrin.

Kloetzer, L. (2013). Development of professional concepts through work analysis : Tech diving under the loop of activity clinic. *Mind, Culture, and Activity*, *20*, 318–337.

Kneale, W. (1952). Review of piaget's "traité de logique". *Philosophical Quaterly*, *3*(6), 91-93.

Koerber, S., Sodian, B., Thoermer, C., & Nett, U. (2005). Scientific reasoning in young children : Preschoolers' ability to evaluate covariation evidence. *Swiss Journal of Psychology*, *64*(3), 141–152.

Kohler, A. (2010a). Analyse interlocutoire d'une tâche collective médiatisée par ordinateur : entre collaboration et rapport de force. *Cahiers de psychologie et éducation (Université de Neuchâtel)*, *45*, 17–38.

Kohler, A. (2010b). To think human out of the machine paradigm : Homo ex machina. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *44*(1), 39-57.

Kohler, A. (2014a). Cause and catalyst : A differentiation. In : K. R. Cabell & J. Valsiner (Eds.), *The Catalyzing Mind* (Vol. 11, p. 33-70). Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer. doi: 10.1007/978-1-4614-8821-7_3

Kohler, A. (2014b). Semiotic coevolution by organic and sociocultural selection. *Culture & Psychology*, *20*(2), 192-202.

Kohler, A. (2017). Discours raccourcis et raccourcis de pensée : l'exemple de la réification. *Enjeux Pédagogiques*, *28*(1), 13-14.

Kohler, A. (2018). From the logic of the child to a natural logic : Perspectives as knowledge. *Human Arenas*, *1*(1), 97-111. Consulté sur https://rdcu.be/bn7wr doi: https://doi.org/10.1007/s42087-018-0007-9

Kohler, A. (2020). Was piaget perspectivist in epistemology ? *Human Arenas*, 492-499. Consulté sur http://dx.doi.org/10.1007/s42087-020-00101-1 doi: 10.1007/s42087-020-00101-1

Kohler, A., & Chabloz, B. (2017). Using signs for teaching physics : From semiotic tools to situations of misunderstanding. In : A. L.-V. Azcárate (Ed.), *Interdisciplinary Approaches to Semiotics* (p. 185-208). Rijeka : InTech.

Kohler, A., Chabloz, B., & Perret-Clermont, A.-N. (2015). Dispositifs d'enseignement mi-finis : une condition de collaboration entre enseignants et chercheurs ? *Cahiers de psychologie et éducation (Université de Neuchâtel)*, *51*, 5-26.

Kono, T. (2010). The "extended mind" approach for a new paradigm of psychology. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *44*, 329-339.

Koponen, I. T., & Kokkonen, T. (2014). A systemic view of the learning and differentiation of scientific concepts : The case of electric current and voltage revisited. *Frontline Learning Research*, *5*, 140-166.

Kostulski, K., & Trognon, A. (1997). La logique interlocutoire comme outil d'analyse de l'accomplissement du travail collectif : l'exemple de la négociation commerciale. *Psychologie du travail et des organisations*, *3*(1-2), 32-45.

Kostulski, K., & Trognon, A. (1998). Le domaine cognitif de l'interlocution : un exercice d'analyse interlocutoire d'une transmission orale dans une équipe paramédicale. In : K. Kostulski & A. Trognon (Eds.), *Communications interactives dans les groupes de travail* (pp. 59–101). Nancy : PUN.

Koyré, A. (1966). *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*. Paris : Presses Universitaires de France.

Koyré, A. (1968). *Etudes newtoniennes*. Paris : Gallimard.

Kuhn, D. (1991). *The skills of argument*. Cambridge : Cambridge University Press.

Kuhn, D., Amsel, E., & O'Loughlin, M. (1988). *The development of scientific reasoning skills*. Orlando : Academic Press.

Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago : The Chicago University Press.

Kynigos, C. (2007). Half-baked logo microworlds as boundary objects in integrated design. *Informatics in Education*, *6*(2), 1-24.

Ladrière, J. (1957). *Les limitations internes des formalismes : étude sur la signification du théorème de Gödel et des théorèmes apparentés dans la théorie des fondements des mathématiques*. Louvain : E. Nauwelaerts ; Paris : Gauthier-Villars.

Lafortune, L., Deaudelin, C., & Doudin, P.-A. (2004). *Conceptions, croyances et représentations en maths, sciences et technos*. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec.

Larochelle, M., & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science : Itinéraires cognitifs d'étudiants*. Québec et Ottawa : Les Presses de l'Université Laval.

Larrain, A. (2016). Argumentation and concept development : the role of imagination. *European Journal of Psychology of Education*. doi: DOI10.1007/s10212-016-0316-7

Latour, B. (1984/2001). *Pasteur : guerre et paix des microbes suivi de Irréductions*. Paris : Éditions La Découverte & Syros.

Latour, B. (2000). When things strike back : a possible contribution of science studies'to the social sciences. *Britisch Journal of Sociology*, *51*(1), 107-123.

Latour, B., & Woolgar, S. (1979). *Laboratory life : the social construction of scientific facts*. London : Sage Publication.

Lautrey, J. (2007). Le constructivisme après piaget : l'apport des modèles de l'auto-organisation. In : S. Ionescu & A. Blanchet (Eds.), *Psychologie du développement et de l'éducation* (p. 7-50). Paris : Presses Universitaires de France.

Lautrey, J., Rémi-Giraud, S., Sander, E., & Tiberghien, A. (2008). *Les connaissances naïves.* Paris : Armand-Colin.

Lautrey, J., & Vergnaud, G. (1997). Piaget aujourd'hui. *Psychologie française*, *42*(1), 3-8.

Lave, J. (1991). Situating learning in communities of practice. In : L. B. Resnick, J. M. Levine, S. D. Teasley, L. B. Levine, J. M. Behrendand, & S. D. Resnick (Eds.), *Perspectives on Socially Shared Cognition* (p. 63-82). American Psychological Association.

Lave, J., & Wenger, E. (1990). *Situated Learning : Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge : Cambridge University Press.

Lefebvre, H. (1969). *Logique formelle. Logique dialectique*. Pris : éditions anthropos.

Legardez, A. (2004). Transposition didactique et rapports aux savoirs : l'exemple des enseignements de questions économiques et sociales,socialement vives. *Revue Française de Pédagogie*(149), 19-27.

Leiman, M. (2012). Dialogical sequence analysis in studying psychotherapeutic discourse. *International Journal for Dialogical Science*, *6*(1), 123-147.

Leitão, S. (2000). The potential of argument in knowledge building. *Human Development*, *43*, 332-360.

Lemeignan, G., & Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique : l'enseignement de la mécanique*. Paris : Hachette éducation.

Le Moigne, J.-L. (1977/2006). *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*. IC-MCX-APC : Classiques du RIC.

Leontiev, A. N. (1975/1984). *Activité. Conscience. Personnalité*. Moscou : Editions du Progrès.

Leontiev, A. N. (2009). *Activity and Consciousness*. Marxists Internet Archive. Consulté sur https://www.marxists.org

Leplat, J., & Hoc, J.-M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahier de Psychologie Cognitive*, *3*(1), 49-63.

Lessard-Hébert, M., Goyette, G., & Boutin, G. (1997). *La recherche qualitative : fondements et pratiques*. Bruxelles : De Boeck.

Leutenegger, F. (2000). Construction d'une "clinique" pour le didactique. une étude des phénomènes temporels de l'enseignement. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *20*(2), 209-250.

Leutenegger, F. (2009). *Le temps d'instruire*. Bern : P. Lang.

Lewin, K. (1931). The conflict between aristotelian and galileian modes of thought in contemporary psychology. *Journal of General Psychology*, *5*, 141-177.

Lewin, K. (1935). *A Dynamic Theory of Personality*. New York, London : McGraw-Hill Company Inc.

Lewin, K. (1959). *Psychologie dynamique*. Paris : Presses Universitaires de France.

Ligorio, M. B. (2010). Dialogical relationship between identity and learning. *Culture & Psychology*, *16*(1), 93-107.

Ligorio, M. B., & César, M. (Eds.). (2013). *Interplays between Dialogical Learning and Dialogical Self*. Charlotte, NC : Information Age Publishing Inc.

Ligozat, F. (2008). *Un point de vue de didactique comparée sur la classe de mathématiques : étude de l'action conjointe du professeur et des élèves à propos de l'enseignement, apprentissage de la mesure des grandeurs dans des classes françaises et suisses romandes* Thèse de doctorat non publiée. Université Aix-Marseille 1 en cotutelle avec l'Université de Genève , en partenariat avec Université de Provence. Faculté des lettres et sciences humaines.

Ligozat, F., & Leutenegger, F. (2008). Construction de la référence et milieux différentiels dans l'action conjointe du professeur et des élèves. le cas de l'agrandissement des distances. *Recherches en Didactique des Mathématiques*(28), 319-378.

Ligozat, F., & Orange, C. (Eds.). (2017). *La modélisation des savoirs dans les analyses didactiques des situations d'enseignement et apprentissage* (Vol. 29). Nantes : Université de Nantes.

Linell, P. (1995). Troubles with mutualities : toward a dialogical theory of misunderstanding and miscommunication. In : I. Marková, C. Graumann, & K. Foppa (Eds.), *Mutualities in dialogue* (p. 176-213). Cambridge : Cambridge University Press.

Linell, P. (1998). *Approaching dialogue. Talk, interaction, and contexts in dialogical perspectives*. Amsterdam / Philadelphia : John Benjamis Publishing Company.

Linell, P. (2009). *Rethinking Language, Mind and World Dialogically : Interactional and Contextual Theories of Human Sense-Making*. Charlotte, NC : Information Age Publishing Inc.

Linell, P., & Marková, I. (Eds.). (2014). *Dialogical Approches to Trust in Communication*. Charlotte, NC : Information Age Publisher.

Lopes, J.-B., Costa, N., Weil-Barais, A., & Dumas Carré, A. (1999). Évaluation de la maîtrise des concepts de la mécanique chez des étudiants et des professeurs. *Didaskalia*(14), 11-38.

Lotman, Y. M., & Uspensky, B. A. (1978). On the semiotic mechanism of culture. *New LIterary History*, *9*(2), 211-232.

Ludvigsen, S., Rasmussen, I., Krange, I., Moen, A., & Middleton, D. (2010). Intersecting trajectories of participation ; temporality and learning. In : S. Ludvigsen, I. Rasmussen, L. A., & R. Säljö (Eds.), *Learning across sites.* London, New York : Routledge.

Lund, K. (2016). *Modeling the Individual Within the Group : An Interdisciplinary Approach to Knowledge Co-construction*. Note de synthèse pour l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Grenoble Alpes.

Lund, K., & Bécu-Robinault, K. (2013). Conceptual change and sustainable coherency of concepts across modes of interaction. In : *Productive Multivocality in the Analysis of Group Interaction* (p. 311-330). New York : Sprin.

Lund, K., Molinari, G., Séjourné, A., & Baker, M. (2007). How do argumentation diagrams compare when student pairs use them as a means for debate or as a tool for representing debate ? *Computer-supported collaborative Learning*, *2*, 273-295.

Malkoun, L., & Tiberghien, A. (2008). Objets de savoir et processus scientifiques en jeu dans les productions discursives en classe de physique au lycée. In : L. Filliettaz & M. L. Schubauer-Leoni (Eds.), *Processus interactionnels et situations éducatives* (p. 67-88). Editions De Boeck Université.

Mammen, J. (2018). *A New Logical Foundation for Psychology*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Margolinas, C. (1997). Le milieu et le contrat, concepts pour la construction et l'analyse de situations d'enseignement. In : N. Robert (Ed.), *Université d'été de La Rochelle, La Rochelle, France.* (p. 13-16). Consulté sur halshs-00421845

Margolinas, C. (2004). *Points de vue de l'élève et du professeur. Essai de développement de la théorie des situations didactiques*. Thèse de doctorat, Université de Provence - Aix-Marseille I. Consulté sur tel-00429580v2

Margolinas, C., & Laparra, M. (2009). Analyse de situations et production des inégalités scolaires. In : F. Leutenegger et al. (Eds.), *Premier colloque de didactique comparée : Où va la didactique comparée ? Genève, Switzerland. Université de Genève, FPSE-SSED & ARCD* (p. 1-12). Consulté sur halshs-00429565

Marková, I. (2007). *Dialogicité et représentations sociales*. Paris : Presses Universitaires de France.

Marková, I. (2013). Dialogical knowing and believing : Trust and responsability in the context of learning. In : M. B. Ligorio & M. César (Eds.), *Interplays Between Dialogical Learning and Dialogical Self* (p. 3-26). Charlotte, NC : Information Age Publishing.

Marmion, J.-F. (Ed.). (2018). *Psychologie de la connerie*. Auxerre : Sciences Humaines Éditions.

Marro, P. (2004). Résoudre un problème de fabrication assistée par ordinateur. une analyse socio-cognitive. *Hermès*, *39*, 160-169.

Martin, J. (2007). Triangles in context : A comment on gillespie, cornish, and psaltis. *Human Development*, *50*, 230–233.

Martinand, J.-L. (1983). Questions pour la recherche : la référence et le possible dans les activités scientifiques scolaires. In : G. Delacôte & A. Tiberghien (Eds.), *Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international* (p. 227-249). Paris : Éditions du CNRS.

Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière ; des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*. Berne : Peter Lang.

Martinand, J.-L., Astolfi, J.-P., Drouin, A.-M., Genzling, J.-C., & Rumelhard, G. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.

Martinand, J.-L., Host, V., Paulin, M., & Alemanni, L. (1980). *Activités d'éveil scientifiques à l'école élémentaire* (Rapport technique). INRP.

Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning ? *American Psychologist*, *59*, 14-19.

McAlister, S. (2001). *Argumentation and a Design for Learning* (Rapport technique N° CALRG Report No. 204). Centre for Information Technology in Education, Institute of Educational Technology, The Open University, Milton Keynes.

McCloskey, M. (1983). L'intuition en physique. *Pour la science*, *68*, 68-75.

McCloskey, M., Washburn, A., & Felch, L. (1983). Intuitive physics : The straight-down belief and its origin. *Journal of Experimental Psychology*, *9*(4), 636-649.

McRoy, S. W. (1995). Misunderstanding and the negotiation of meaning using abduction. *Knowledge-Based Systems*, *8*(2-3), 126-134.

Mead, G. H. (1934). *Self, Mind and society*. Chicago : Chicago : University of Chicago Press.

Mehmeti, T., & Perret-Clermont, A.-N. (2016). Seeking success of migrant students through designed tasks : a case study with albanian students in switzerland. In : A. Surian (Ed.), *Open Spaces for Interactions and Learning Diversities* (p. 137-150). Rotterdam : Sense Publishers.

Meirieu, P. (1996). La pédagogie différenciée : enfermement ou ouverture ? In : *Acte VI. L'école : diversité et cohérence.* Paris : Nathan.

Meirieu, P. (2005). *Lettre à un jeune professeur*. Paris : ESF Editeur.

Mercer, N. (1995). *The Guided Construction of Knowledge : Talk Amongst Teachers and Learners*. Clevedon : Multilingual Matters.

Mercer, N. (2004). Sociocultural discourse analysis : analysing classroom talk as a social mode of thinking. *Journal of Applied Linguistics*, *1*(2), 137–168.

Mercer, N. (2008a). Changing our minds : a commentary on 'conceptual change : a discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education'. *Cultural Studies of Science Education*, *3*(2), 351-362.

Mercer, N. (2008b). The seeds of time : why classroom dialogue needs a temporal analysis. *The Journal of the Learning Sciences*, *17*, 33-59.

Mercer, N., Dawes, L., Wegerif, R., & Sams, C. (2004). Reasoning as a scientist : ways of helping children to use language to learn science. *British Educational Research Journal*, *30*(3), 359-377.

Mercer, N., & Howe, C. (2012). Explaining the dialogic process of teaching and learning : The value and potential of sociocultural theory. *Learning, Culture and Social Interaction*, *1*(1), 12-21.

Mercer, N., & Wegerif, R. (1998). Is "exploratory talk" productive talk ? In : K. Littleton & P. Light (Eds.), *Learning with Computers : Analysing productive interaction* (pp. 79–101). Routledge, London and New York.

Meyer, M. (Ed.). (1986a). *De la métaphysique à la rhétorique*. Bruxelles : Éditions de l'Université de Bruxelles.

Meyer, M. (1986b). Pour une anthropologie rhétorique. In : M. Meyer (Ed.), *De la métaphysique à la rhétorique* (p. 119-142). Bruxelles : Éditions de l'Université de Bruxelles.

Michotte, A. (1954). *La perception de la causalité*. Louvain : Publications universitaire de Louvain.

Milne, C., Kirch, S., Basu, S. J., Leou, M., & Fraser-Abder, P. (2008). Understanding conceptual change : connecting and questioning. *Cultural Studies of Science Education*, *3*(2), 417-434.

Minstrell, J., & Zee, E. v. (2005). *Inquiring into inquiry learning and teaching in science*. Washington : American Association for the Advancement of Science.

Miéville, D. (1979). Exemples dans le discours pédagogique. *Revue européenne des sciences sociales*, *2*(45), 119-142.

Miéville, D. (1981). Explication et discours didactique de la mathématique. *Revue européenne des sciences sociales*, *3*(56), 115-152.

Miéville, D. (1984). *Un développement des systèmes logiques de Stanislaw Leśniewski : protothétique, ontologie, méréologie*. Berne : Peter Lang.

Miéville, D. (1989). "parce que" : formalisation de quelques relateurs logiques. In : C. Rubattel (Ed.), *Modèles du discours : recherches actuelles en Suisse romande : actes des Rencontres de linguistique française.* Berne : Peter Lang.

Miéville, D. (1992). Esquisse d'une grammaire des organisations raisonnées. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *60*, 9-25.

Miéville, D. (1997). La classe-objet de discours a-t-elle des creux ou des bosses ? In : D. Miéville & A. Berrendonner (Eds.), *Logique, discours et pensée. Mélanges offerts à Jean-Blaise Grize.* (p. 103-119). Berne : Peter Lang.

Miéville, D., & Vernant, D. (Eds.). (1996). *Stanislaw Leśniewski, aujourd'hui*. Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.

Molenaar, P. C. M., & Valsiner, V. (2005). How generalization works through the single case : A simple idiographic process analysis of an individual psychotherapy case. *International Journal of Idiographic Science*, *1*(1), 1-13.

Monteil, J.-M., & Huguet, P. (1991). Insertion sociale, catégorisation sociale et activités cognitives. *Psychologie Française*, *36*(1), 35-46.

Morf, A., Grize, J.-B., & Pauli, L. (1969). Pour une pédagogie scientifique. *Dialectica*, *23*(1), 24-31.

Morin, E. (1982/1990). *Science avec conscience*. Paris : Librairie Arthème Fayard & Editions du Seuil.

Morin, E. (1999). *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*. Paris : UNESCO.

Moscovici, S. (1984). Introduction : le domaine de la psychologie sociale. In : S. Moscovici (Ed.), *Psychologie sociale* (p. 5-22). Paris : Presses Universitaires de France.

Moscovici, S. (Ed.). (1984/1998). *Psychologie sociale*. Paris : Presses Universitaires de France.

Moscovici, S., & Marková, I. (2006). *The Making of Modern Social Psychology*. Malden : Polity Press.

Mounoud, P. (2000). Le développement cognitif selon piaget. structures et points de vue. In : O. Houdé & C. Meljac (Eds.), *L'esprit piagétien : hommage international à Jean Piaget* (p. 191-211). Paris : Presses Universitaires de France.

Mugny, G., & Carugati, F. (1985). *L'intelligence au pluriel*. Cousset (FR) : Editions Delval.

Muller Mirza, N., & Buty, C. (Eds.). (2015). *L'argumentation dans les contextes de l'éducation*. Berne : Peter Lang.

Muller Mirza, N., & Perret-Clermont, A. N. (2008). Dynamiques interactives, apprentissages et médiations : analyses de constructions de sens autour d'un outil pour argumenter. In : L. Filliettaz & M. L. Schubauer-Leoni (Eds.), *Processus interactionnels et situations éducatives* (p. 231-253). De Boeck, Bruxelles.

Muller Mirza, N., & Perret-Clermont, A. N. (2009). *Argumentation and Education : Theoretical Foundation and Practices*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Muller Mirza, N., Tartas, V., Perret-Clermont, A. N., & De Pietro, J.-F. (2007). Using graphical tools in a phased activity for enhancing dialogical skills : An example with digalo. *Computer-supported collaborative Learning*, *2*, 247-272.

Nicolet, M., Grossen, M., & Perret-Clermont, A.-N. (1988). Testons-nous des compétences cognitives ? contribution psychosociologique à l'analyse de la situation de test à travers l'étude de conduites aux épreuves opératoires piagétiennes. *Revue Internationale de Psychologie Sociale*(I), 71-91.

Nonnon, E. (1996). Activités argumentatives et élaboration de connaissances nouvelles : le dialogue comme espace d'exploration. *Langue Française*, *112*, 67-87.

Oberle, C. D., McBeath, M. K., Madigan, S. C., & Sugar, T. G. (2005). The galileo bias : A naive conceptual belief that influences people's perceptions and performance in a ball-dropping task. *Journal of Experimental Psychology*, *31*(4), 643-653.

Oeuvray, G., Dubach, P., & Cappelli, S. (2006). *Etudiants des hautes écoles universitaires 2005/06* (Rapport technique). Office Fédéral de la Statistique. Consulté sur http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/15/22/publ.Document.78568.pdf

O.F.S. (Ed.). (2013, février). Éducation et science. *Panorama*, 1-13.

Ogborn, J. (1993). Approches théorique et empirique de la causalité. *Didaskalia*, *1*, 29-47.

Orange, C. (2005a). Problème et problématisation dans l'enseignement scientifique. *Aster*, *40*, 3–11.

Orange, C. (2005b). Problématisation et conceptualisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle*, 69-94.

Osborne, J., Erduran, S., & Simon, S. (2004a). Enhancing the quality of argumentation in school science. *Journal of Research in Science Teaching*, *41*(10), 994-1020.

Osborne, J., Erduran, S., & Simon, S. (2004b). *Ideas, Evidence & Argument in Science*. London : King's College London.

Osborne, J., Erduran, S., Simon, S., & Monk, M. (2001). Enhancing the quality of argument in school science. *School Science Review*, *82*(301), 63-70.

Ozdemir, G., & Clark, D. B. (2007). An overview of conceptual change theories. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, *3*(4), 351-361.

Paavola, S., & Hakkarainen, K. (2005). The knowledge creation metaphor - an emergent epistemological approach to learning. *Science and Education*, *14*, 535-557.

Papert, S., Vassallo-Villaneau, R.-M., & Perriault, J. (1981). *Jaillissement de l'esprit : ordinateurs et apprentissage*. Paris : Flammarion.

Papert, S., Watt, D., diSessa, A., & Weir, S. (1979, September). *Final Report of the Brookline Logo Project Part II : Project Summary and Data Analysis* (Rapport technique). Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory.

Park, D., & Moro, Y. (2006). Dynamics of situation definition. *Mind, Culture, and Activity*, *13*, 101-129.

Passeron, J.-C. (1991). *Le raisonnement sociologique. L'espace non-poppérien du raisonnement naturel*. Paris : Nathan.

Pastré, P. (2007). Activités et apprentissages en didactique professionnelle. In : M. Durand & M. Fabre (Eds.), *Les situations de formation entre savoirs, problèmes et activités* (p. 103-121). Paris : L'Harmattan.

Pastré, P., Mayen, P., & Vergnaud, G. (2006). La didactique professionnelle. *Revue française de pédagogie*, *154*, 145-198.

Pauen, S. (1996). Children's reasoning about the interaction of forces. *Child Development*, *67*, 2728-2742.

Pauen, S., & Wilkening, F. (1997). Children's analogical reasoning about natural phenomena. *Journal of Experimental Child Psychology*, *67*, 90–113.

Pellaud, F., Eastes, R.-E., & Giordan, A. (2005). Un modèle pour comprendre l'apprendre : le modèle allostérique. *Gymnasium Helveticum*, *5*(1), 28-33.

Perelman, C., & Olbrechts-Tyteca, L. (1958/2000). *Traité de l'argumentation*. Bruxelles : Editions de l'Université de Bruxelles.

Perkins, D. N., & Grotzer, T. A. (2005). Dimensions of causal understanding : the role of complex causal models in students' understanding of science. *Studies in Science Education*, *41*, 117-166.

Perrenoud, P. (1989). La triple fabrication de l'échec scolaire. *Psychologie française*, *34*(4), 237-245.

Perrenoud, P. (1994/1995). *Métier d'élève et sens du travail scolaire*. Paris : ESF.

Perret-Clermont, A.-N. (1976). Vers une approche des relations entre l'enfant, l'école et la vie sociale à travers l'étude de la communication. *Cahiers de la Section des Sciences de l'Education de l'Université de Genève*, *2*, 3-13.

Perret-Clermont, A.-N. (1979). *La construction de l'intelligence dans l'interaction sociale*. Berne : Peter Lang.

Perret-Clermont, A.-N. (1979/2000). Interactions sociales dans le développement cognitif : nouvelles directions de recherche. In : A.-N. Perret-Clermont (Ed.), *La construction de l'intelligence dans l'interaction sociale* (p. 261-286). Berne : Peter Lang.

Perret-Clermont, A.-N. (1980). Recherche en psychologie sociale expérimentale et activité éducative. *Revue Française de Pédagogie*, *53*, 30-38.

Perret-Clermont, A. N. (1991). La interacción social como espacio de pensamiento [l'interaction sociale comme espace de pensée]. *Anthropos : Boletín de información y documentación*, *124*, 45-47.

Perret-Clermont, A.-N. (1992). Les implicites dans les situations d'apprentissage. *Cahiers de l'Institut Supérieur de Pédagogie de l'Université Catholique de Paris*, *19*, 20-53.

Perret-Clermont, A.-N. (2000). Apprendre et enseigner avec efficience à l'école. In : U. P. Trier (Ed.), *Efficacité de la formation entre recherche et politique* (pp. 111–134). Zürich : Ruegger.

Perret-Clermont, A.-N. (2001). Psychologie sociale de la construction de l'espace de pensée. In : J. Ducret (Ed.), *Actes du colloque. Constructivisme : usages et perspectives en éducation* (Vol. I, p. 65-82). Genève : Département de l'Instruction Publique : Service de la recherche en éducation.

Perret-Clermont, A.-N. (2004). Articuler l'individuel et le collectif. *Nouvelle Revue de Psychologie Sociale*, *3*, 94-102.

Perret-Clermont, A.-N. (2005). *Thinking Time : a Multidisciplinary Perspective on Time*. Seattle, Toronto, Göttingen, Bern : Hofrege & Huber Publishers.

Perret-Clermont, A. N. (2006). Comments on rigotti & rocci. *Studies in Communication Sciences*, *6*(2), 181-188.

Perret-Clermont, A. N. (2011). Social relationships and thinking spaces for growth. *Cahiers de Psychologie*, *47*, 8–17.

Perret-Clermont, A.-N. (2015). The architecture of social relationships and thinking spaces for growth. In : C. P. A. Gillespie & A.-N. Perret-Clermont (Eds.), *Social Relations in Human and Societal Development* (p. 51-70). London, New York : Palgrave.

Perret-Clermont, A.-N., Arcidiacono, F., Breux, S., Greco, S., & Miserez-Caperos, C. (2015). Knowledge-oriented argumentation in children. In : F. H. van Eemeren & B. Garssen (Eds.), *Scrutinizing Argumentation in Practice* (p. 135-149). Amsterdam / Philadelphia : John Benjamis Publishing Company.

Perret-Clermont, A. N., Brun, J., Conne, F., & Schubauer-Leoni, M.-L. (1982). Décontextualisation et recontextualisation du savoir dans l'enseignement des mathématiques à de jeunes élèves. *Interactions didactiques*, *1*, 1-33. Consulté sur http://doc.rero.ch/record/11804?ln=fr

Perret-Clermont, A.-N., Brun, J., Saada, E. H., & Schubauer-Leoni, M.-L. (1984). Psychosociological processes, operatory level and the acquisition of knowledge. *Interactions didactiques*(2 bis), 1-51.

Perret-Clermont, A. N., & Carugati, F. (2001). Social factors in learning and instruction. In : N. J. Smelser & P. B. Baltes (Eds.), *International Encyclopedia of Social and Behavioral Sciences*. Elsevier, Amsterdam.

Perret-Clermont, A.-N., & Carugati, F. (2004). Des psychologues sociaux étudient l'apprentissage. In : G. Chatelanat, C. Moro, & M. Saada-Robert (Eds.), *Unité et pluralité des sciences de l'éducation* (pp. 159–183). Bern : Peter Lang.

Perret-Clermont, A.-N., Gertsch, C., Henry, C., Perret, J.-F., & Suter, C. (1982). Les collectionneurs en herbe. In : J. Hainard & R. Kaehr (Eds.), *Les collectionneurs en herbe* (p. 169-180). Neuchâtel : Collection passion, Musée d'Ethnographie de Neuchâtel.

Perret-Clermont, A.-N., & Muller Mirza, N. (2009). *Argumentation and Education : theoretical foundations and practices*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Perret-Clermont, A.-N., Muller Mirza, N., Perret, J.-F., Kohler, A., & Tateo, L. (2008). Chapter 8 : Description of the experimentations in switzerland & italy. In : B. Schwarz (Ed.), *ESCALATE : The White Book* (p. 227-302). Jerusalem : Hebrew University. Consulté sur http://www.escalate.org.il/Multimedia/upl_doc/D5_1_White_book_v4.pdfhttp://doc.rero.ch/record/20250?ln=fr

Perret-Clermont, A.-N., & Nicolet, M. (1988). *Interagir et connaître. Enjeux et régulations sociales dans le développement cognitif*. Fribourg : DelVal, Cousset.

Perret-Clermont, A.-N., Perret, J.-F., & Bell, N. (1991). The social construction of meaning and cognitive activity in elementary school children. In : L. B. Resnick, J. Levine, & S. Teasley (Eds.), *Perspectives on Socially Shared Cognition* (p. 41-62). Washington D.C. : American Psychological Association.

Perret-Clermont, A.-N., & Schubauer-Leoni, M. L. (1981). Conflict and cooperation as opportunities for learning. In : P. Robinson (Ed.), *Communication in Development*. Academic Press, London.

Perret-Clermont, A.-N., & Schubauer-Leoni, M.-L. (1989). Social factors in learning and teaching : Towards an integrative perspective. *International Journal of Educational Research*, *13*(6), 575-580.

Perret-Clermont, A.-N., Schubauer-Leoni, M.-L., & Grossen, M. (1990). Contexte social du questionnement et modalités d'explication. *Cahiers d'acquisition et de pathologie du langage*, *7/8*, 37-53.

Perret-Clermont, A.-N., Schär, R., Greco Morasso, S., Convertini, J., Iannaccone, A., & Rocci, A. (2019). Shifting from a monological to a dialogical perspective on childrens argumentation. lessons learned. In : F. H. van Eemren & B. Garssen (Eds.), *Argumentation in actual practice. Topical studies about argumentative discourse in context* (p. 211-236). Amsterdam : John Benjamins Publishing Company. doi: 10.1075/aic.17.12per

Petitot, J. (1994). La semiophysique : de la physique qualitative aux sciences cognitives. In : M. Porte (Ed.), *Passion des formes : Dynamique qualitative, sémiophysique et intelligibilité* (p. 499-543). ENS Editions.

Piaget, J. (1925). Psychologie et critique de la connaissance. *Archives de psychologie*, *19*, 193–210.

Piaget, J. (1927). *La causalité physique chez l'enfant*. Paris : Félix Alcan.

Piaget, J. (1937/1967a). La causalité. In : *La construction du réel chez l'enfant* (p. 191-279). Lausanne, Paris : Delachaux et Niestlé.

Piaget, J. (1937/1967b). *La construction du réel chez l'enfant*. Lausanne, Paris : Delachaux et Niestlé.

Piaget, J. (1945/1978). *La formation du symbole chez l'enfant*. Lausanne, Paris : Delachaux et Niestlé.

Piaget, J. (1946). *Le développement de la notion du temps*. Paris : Presses Universitaires de France.

Piaget, J. (1957). Le mythe de l'origine sensorielle des connaissances scientifiques. *Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*, *137*, 20-34.

Piaget, J. (1964). *Six études de psychologie*. Paris : Denoël Gonthier.

Piaget, J. (1967a). *La construction du réel chez l'enfant*. Neuchâtel, Paris : Delachaux et Niestlé.

Piaget, J. (1967b). *Logique et connaissance scientifique*. Paris : Editions Gallimard.

Piaget, J. (1967/1992). *Biologie et connaissance*. Neuchâtel, Paris : Delachaux et Niestlé.

Piaget, J. (1968). Genetic epistemology. a series of lectures delivered by piaget at columbia university. New York : Columbia University Press.

Piaget, J. (1970). L'épistémologie génétique. In : *Psychologie et épistémologie.* Denoël Gonthier.

Piaget, J. (1972a). *La transmission des mouvements*. Paris : Presses Universitaires de France.

Piaget, J. (1972b). L'épistémologie des relations interdisciplinaires. In : L. Apostel (Ed.), *L'interdisciplinarité : Problèmes d'enseignement et de recherche dans les universités* (p. 131-144). Paris : OCDE.

Piaget, J. (1974a). Histoire et développement de la causalité. *Raison Présente*, *30*, 5-20.

Piaget, J. (1974b). *La prise de conscience*. Paris : Presses Univ. de France.

Piaget, J. (1974c). *Réussir et comprendre*. Paris : Presses Universitaires de France.

Piaget, J. (1980). *Les formes élémentaires de la dialectique*. Saint-Amand : Gallimard.

Piaget, J., & Garcia, R. (1971). *Les explications causales*. Paris : Presses Universitaires de France.

Piaget, J., & Garcia, R. (1987). *Vers une logique des significations*. Genève : Murionde.

Piaget, J., & Inhelder, B. (1948). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France.

Pichonnaz, P. (2003). Le malentendu productif. In : P. Gauch & P. Pichonnaz (Eds.), *Figures juridiques : mélanges dissociés pour Pierre Tercier à l'occasion de son soixantième anniversaire.* (p. 167-176). Zurich, Bâle, Genève : Schulthess Verlag.

Piérault-Le Bonniec, G. (1997). Exemples de raisonnements en situation de travail. In : D. Miéville & A. Berrendonner (Eds.), *Logique, discours et pensée. Mélanges offerts à Jean-Blaise Grize.* (p. 393-408). Berne : Peter Lang.

Plantin, C. (1996). *L'argumentation*. Paris : Seuil.

Plantin, C. (2005). *L'argumentation : histoire, théories et perspectives*. Paris : Presses Universitaires de France.

Poliakov, L. (1980). *La causalité diabolique*. Paris : Editions Calmann-Lévy.

Pollaroli, C., & Rocci, A. (2015). The argumentative relevance of pictorial and multimodal metaphor in advertising. *Journal of Argumentation in Context*(4), 158-199.

Popper, K. (1959/2005). *The Logic of Scientific Discovery (translated from "Logik der Forschung", 1934).* London, New York : Routledge.

Popper, K. (1992). *Un univers en propension : deux études sur la causalité et l'évolution*. Combas : Editions de l'Eclat.

Psaltis, C., Duveen, G., & Perret-Clermont, A. N. (2009). The social and the psychological : Structure and context in intellectual development. *Human Development*, *52*, 291-312.

Psaltis, C., & Zapiti, A. (2014). *Interaction, Communication and Development. Psychological development as a social process*. London : Routledge.

Pérez, J. A., Mugny, G., Maggi, J., & Butera, F. (1995). L'élaboration du conflit dans l'influence sociale. In : J.-L. Beauvois (Ed.), *La psychologie sociale* (pp. 225–233). Grenoble : Presses universitaires de Grenoble.

Quignard, M. (2000). *Modélisation cognitive de l'argumentation dialoguée : étude de dialogues d'élèves en résolution de problèmes de sciences physiques*. Thèse de doctorat en Sciences cognitives, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies : une approche cognitive des instruments contemporains*. Paris : Armand Colin.

Rabatel, A. (2006). La dialogisation au coeur du couple polyphonie/dialogisme chez bakhtine. *Revue Romane*, *41*, 55-80.

Rayou, P., & Sensevy, G. (2014). Contrat didactique et contextes sociaux. la structure d'arrière-plans des apprentissages. *Revue française de pédagogie*, 23-28.

Reed, E. S. (1997). Defending experience : A philosophy for the post-modern world chapter one. have you ever been experienced ? philosophy meets the real world. *The Genetic Epistemologist*, *25*, 1-9.

Reiner, M., & Gilbert, K. (2004). The symbiotic roles of empirical experimentation and thought experimentation in the learning of physics. *International Journal of Science Education*, *26*(15), 1819–1834.

Reiner, M., Slotta, J. D., & Chi, M. T. H. (2000). Naive physics reasoning : A commitment to substance-based conceptions. *Cognition and Instruction*, *18*(1), 1-34.

Reuter, Y., Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I., & Lahanier-Reuter, D. (2013). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. Louvain-la-Neuve : : De Boeck Supérieur.

Richoux, B., & Salvetat, C. (2002). Simulation numérique dans l'enseignement de la physique : enjeux, conditions. *Bulletin de l'union des physiciens*, *842*(96), 497-521.

Rigotti, E. (2006). Relevance of context-bound loci to topical potential in the argumentation stage. *Argumentation*, *20*(4), 519-540.

Riopel, M., Raîche, G., & Potvin, P. (2006). Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur. *ASTER*, *43*, 57-80.

Rochat, P. (2006). *Le monde des bébés*. Paris : Odile Jacob.

Rochex, J.-Y. (1997). L'oeuvre de vygostki : fondements pour une psychologie historico-culturelle. *Revue Française de Pédagogie*, *120*, 105-147.

Rogers, C. (1969/1984). *Liberté pour apprendre*. Paris : Dunod.

Rogoff, B. (1998). Cognition as a collaborative process. In : W. Damon (Ed.), *Handbook of child psychology 5th edition* (Vol. 2, pp. 679–744). Wiley, NewYork.

Rommetveit, R. (1976). On the architecture of intersubjectivity. In : L. Strickland, K. Gergen, & F. Aboud (Eds.), *Social Psychology in Transition* (p. 215-221). New York : New York : Plenum Press.

Rommetveit, R. (1978). On piagetian cognitive operations, semantic competence, and message structure in adult-child communication. In : J. Markova (Ed.), *The Social Context of Language* (p. 113-150). London : New York : Wiley.

Roque, G. (2012). Visual argumentation : A further reappraisal. In : F. H. van Eemeren & B. Garssen (Eds.), *Topical Themes in Argumentation Theory : Twenty Exploratory Studies* (pp. 273–288). Dordrecht : Springer Netherlands. Consulté sur https://doi.org/10.1007/978-94-007-4041-9_18 doi: 10.1007/978-94-007-4041-9_18

Rosenbaum, P., & Valsiner, J. (2011). The un-making of a method : From rating scales to the study of psychological processes. *Theory & Psychology*, *21*, 47-65.

Rosenthal, R., & Jacobson, L. (1968). *Pygmalion in the classroom : Teacher expectation and pupils' intellectual development*. New York : Holt, Rinehart & Winston.

Roth, W.-M. (2008a). The nature of scientific conceptions : A discursive psychological perspective. *Educational Research Review*, *3*, 30-50.

Roth, W.-M. (2008b). A question of competing paradigms ? *Cultural Studies of Science Education*, *3*(2), 373-385.

Roth, W.-M. (2014). Working out the interstitial and syncopic nature of the human psyche : On the analysis of verbal data. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *48*, 283–298.

Rotman, B. (1977). *Jean Piaget, Psychologist of the Real*. Ithaca & New York : Cornell University Press.

Rouiller, Y., & Lehraus, K. (Eds.). (2008). *Vers des apprentissages en coopération : rencontres et perspectives*. Bern : P. Lang.

Rumelhard, G. (2000). *Les formes de causalité dans les sciences de la vie et de la terre : approche didactique : représentation, conceptualisation, modélisation*. Paris : Institut national de recherche pédagogique.

Russell, B. (1913). On the notion of cause. *Proceedings of the Aristotelian Society*, *13*, 1-26.

Ryser, M., & von Erlach, E. (2007). *Mosaïque de l'éducation en Suisse. Les indicateurs de la formation 2007* (Rapport technique). Office Fédéral de la Statistique.

Saint Onge, M. (1996). *Moi j'enseigne, mais eux apprennent-ils ?* Chomedey, Laval (Québec) : Édition Beauchemin ltée.

Salazar-Orvig, A., & Grossen, M. (2008). Le dialogisme dans l'entretien clinique. *Langage et société*, *1*, 37-52.

Salembier, P., Theureau, J., & Relieu, M. (2004). Introduction au numéro spécial « activité et action/ cognition située ». *@ctivités*, *1*(2), 3-10. Consulté sur http://www.activites.org

Salgado, J., Cunha, C., & Bento, T. (2013). Positioning microanalysis : Studying the self through the exploration of dialogical processes. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *47*(3), 325-353.

Samurçay, R., & Pastré, P. (Eds.). (2004). *Recherche en didactique professionnelle*. Toulouse : Octarès Éditions.

Sannino, A. (1998). L'accomplissement interlocutoire et intergestuel d'une interaction en situation de travail. In : K. Kostulski & A. Trognon (Eds.), *Communications interactives dans les groupes de travail* (pp. 123–157). Presses Universitaires de Nancy, Nancy.

Sannino, A., Trognon, A., Dessagne, L., & Kostulski, K. (2001). Les connaissances émergeant d'une relation tuteur-apprenti sur le lieu de travail. *Bulletin de psychologie*, *453*(3), 261-273.

Sawyer, R. K. (Ed.). (2006a). *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*. New York : Cambridge University Press.

Sawyer, R. K. (2006b). The new science of learning. In : R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (p. 1-16). New York : Cambridge University Press.

Saxe, R., & Carey, S. (2006). The perception of causality in infancy. *Acta Psychologica*, *123*(1-2), 144–165.

Sayer, I. M. (2013). Misunderstanding and language comprehension. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *70*, 738 – 748.

Schauble, L., Glaser, R., Duschl, R., Schultz, S., & John, J. (1995). Students' understanding of the objectives and procedures of experimentation in the science classroom. *The Journal of the Learning Sciences*(4), 131-166.

Schauble, L., Glaser, R., Raghavan, K., & Reiner, M. (1991). Causal models and experimentation strategies in scientific reasoning. *The Journal of the Learning Sciences*, *1*(2), 201-238.

Schiffrin, D., Tannen, D., & Hamilton, H. E. (Eds.). (2005). *The Handbook of Discourse Analysis*. Oxford : Blackwell Publishers Ltd.

Schnotz, W., Vosniadou, S., & Carretero, M. (1999). *New Perspectives on Conceptual Change*. Amsterdam : Elsevier Science.

Scholnick, E. K., Nelson, K., Gelman, S. A., & Miller, P. H. (1999). *Conceptual Development : Piaget's Legacy*. Mahwah : Laurence Erlbaum Associates.

Schubauer-Leoni, M. L. (1989). Problématisation des notions d'obstacle épistémologique et de conflit socio-cognitif dans le champ pédagogique. In : N. Bednarz & C. Garnier (Eds.), *Construction des savoirs* (pp. 350–363). Ottawa : Les éditions Agence d'ARC.

Schubauer-Leoni, M.-L., & Grossen, M. (1984). Formulation écrite de problèmes additifs et interactions sociales : Etablissement d'une typologie d'écriture et analyse de "contenu" des formulations. *Interactions didactiques*(5), 1-167.

Schubauer-Leoni, M.-L., & Perret-Clermont, A.-N. (1980). Interactions sociales et représentations symboliques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *1*(3), 299-350.

Schubauer-Leoni, M.-L., & Perret-Clermont, A.-N. (1984). Construction sociale d'écriture symboliques en deuxième primaire (opérations additives). *Interactions didactiques*(4), 1-40.

Schubauer-Leoni, M.-L., & Perret-Clermont, A.-N. (1985/1991). Interactions sociales dans l'apprentissage de connaissances mathématiques chez l'enfant. In : G. Mugny (Ed.), *Psychologie sociale du développement cognitif,* (p. 225-250). Berne : Peter Lang.

Schubauer-Leoni, M.-L., Perret-Clermont, A. N., & Grossen, M. (1992). The construction of adult child intersubjectivity in psychological research and in school. In : M. V. Cranach, W. Doise, & G. Mugny (Eds.), *Social Representations and the social Bases of Knowledge* (Vol. 1, p. 69-77). Bern & Lewiston : Hogrefe & Huber Publishers.

Schuhl, P.-M. (Ed.). (1962). *Les Stoïciens*. Paris : Éditions Gallimard.

Schwartz, B., & Lambrichs, L. L. (1994). *Moderniser sans exclure*. Paris : Éditions La Découverte.

Schwarz, B. (2008). *ESCALATE : The White Book* (Rapport technique). The Hebrew University of Jerusalem. Consulté sur http://www.escalate.org.il/Multimedia/upl_doc/D5_1_White_book_v4.pdf

Schwarz, B., & Baker, M. (2015). Sur l'adéquation des théories de l'argumentation aux sciences de l'apprentissage et les fondements d'une théorie de "l'argumentissage". In : N. Muller Mirza & C. Buty (Eds.), *L'argumentation dans les contextes de l'éducation* (p. 269-322). Berne : Peter Lang.

Schwarz, B., & Baker, M. (2017). *Dialogue, Argumentation and Education*. New York : Cambridge University Press.

Schwarz, B., Dreyfus, T., & Hershkowitz, R. (Eds.). (2009). *Transformation of Knowledge Through Classroom Interaction*. London : Routledge.

Schwarz, B., & Glassner, A. (2003). *Designing CSCL argumentative environments for broadening understanding of the space of debate.*

Schwarz, B., Neuman, Y., & Biezuner, S. (2000). Two wrongs may make a right... if they argue together ! *Cognition and Instruction*, *18*(4), 461-494.

Schwarz, B., Neuman, Y., Gil, J., & Ilya, M. (2003). Construction of collective and individual knowledge in argumentative activity. *The Journal of the Learning Sciences*, *12*(2), 219-256.

Schwarz, B., Perret-Clermont, A., Trognon, A., & Marro, P. (2008). Emergent learning in successive activities. learning in interaction in a laboratory context. *Pragmatics & Cognition*, *16*(1), 57-87.

Searle, J. R. (1991). L'intentionnalité collective. In : H. Parret (Ed.), *La communication en paroles : communication, consensus, ruptures* (p. 227-245). Bruxelles : Mardaga.

Searle, J. R. (1995). *La redécouverte de l'esprit*. Paris : Gallimard.

Searle, J. R., & Vanderveken, D. (1985). *Foundations of illocutionary logic*. Cambridge : Cambridge University Press.

Seidel, T., & Prenzel, M. (2006). Stability of teaching patterns in physics instruction : findings from a video study. *Learning and Instruction*, *16*, 228-240.

Sensevy, G. (2011). *Le sens du savoir. Eléments pour une théorie de l'action conjointe en didactique*. Bruxelles : De Boeck.

Sensevy, G., & Santini, J. (2006). Modélisation : une approche épistémologique. *ASTER*, *43*, 163-188.

Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., Laubé, S., & Griggs, P. (2008). An epistemological approach to modeling : Cases studies and implications for science teaching. *Science Education*, *92*, 424–446.

Shulman, L. S., & Keislar, E. R. (1973). *La pédagogie par la découverte*. Paris : Les Editions ESF.

Simon, S., Erduran, S., & Osborne, J. (2002). Enhancing the quality of argumentation in school science. In : *Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, April 7-10, 2002 New Orleans.*

Simon, S., Erduran, S., & Osborne, J. (2006). Learning to teach argumentation : Research and development in the science classroom. *International Journal of Science Education*, *28*(2-3), 235–260.

Sinclaire-Harding, L., Miserez, C., Arcidiacono, F., & Perret-Clermont, A.-N. (2013). Argumentation in the piagetian clinical interview. In : M. B. Ligorio & M. César (Eds.), *Interplays Between Dialogical Learning and Dialogical Self* (p. 53-82). Information Age Publishing Inc, Charlotte, NC.

Smith, J. P., diSessa, A. A., & Roschelle, J. (1993). Misconceptions reconceived : A constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Sciences*, *3*(2), 115-163.

Smith, L. (Ed.). (1992). *Jean Piaget : Critical Assessments*. London : Routledge.

Sobel, D. M., & Sommerville, J. A. (2009). Rationales in children's causal learning from others' actions. *Cognitive Development*, *24*, 70-79.

Sokal, A., & Bricmont, J. (1997). *Impostures intellectuelles*. Paris : Éditions Odile Jacob.

Sorsana, C. (1999). Stratégies ssocio-cognitive dans la résolution de la tour de hanoï. In : M. Gilly, J.-P. Roux, & A. Trognon (Eds.), *Apprendre dans l'interaction* (p. 143-161). Nancy : Presses Universitaires de Nancy ; Aix-En-Provence : Publications de l'université de Provence.

Spada, H. (1994). Conceptual change or multiple representations ? *Learning and Instruction*, *4*(1), 113-116.

Sperber, D., Premack, D., & James Premack, A. (1995). *Causal Cognition : A Multidisciplinary Debate*. Oxford : Oxford University Press.

Sperber, D., & Wilson, D. (1986). *La pertinence*. Paris : Les Editions de Minuit.

Spichiger, F., & Grize, J.-B. (1955). Cours de physique. mécanique (Neuchâtel : Imprimerie Nouvelle L.-A. Monnier éd.) [Manuel de logiciel].

Suthers, D. D., Lund, K. S., Rosé, C. P., Teplovs, C., & Law, N. (Eds.). (2013). *Productive Multivocality in the Analysis of Group Interactions*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Säljö, R. (1991). Piagetian controversies, cognitive competence, and assumptions about human communication. *Educational Psychology Review*, *3*(2), 117-126.

Säljö, R. (2010). Learning in a sociocultural perspective. *International Encyclopedia of Education (Third Edition)*, 498-502.

Säljö, R., & Wyndhamn, J. (1993). Solving everyday problems in the formal setting : An empirical study of the school as context for thought. In : J. Lave & S. Chaiklin (Eds.), *Understanding Practice. Perspectives on activity and context.* (p. 327-342). Cambridge : Cambridge University Press.

Séjourné, A., Baker, M., Lund, K., & Molinari, G. (2004). Schématisation argumentative et co-élaboration de connaissances : le cas des interactions médiatisées par ordinateur. In : *Actes du colloque international "Faut-il parler pour apprendre ?"* (p. 1-14). Arras. Actes du colloque international "Faut-il parler pour apprendre ?".

Tartas, V. (2012). *Le développement des connaissances médiatisées chez l'enfant : outils culturels et interactions sociales*. Note de synthese pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse II.

Tartas, V., & Perret-Clermont, A.-N. (2008). Socio-cognitive dynamics in dyadic interaction : How do you work together to solve kohs cubes ? *European Journal of Developmental Psychology*, *5*(5), 561-584.

Tartas, V., Perret-Clermont, A.-N., & Baucal, A. (2016). Experimental micro-histories, private speech and a study of children's learning and cognitive development microhistorias experimentales, habla privada y un estudio del aprendizaje y el desarrollo cognitivo en los niños. *Infancia y Aprendizaje / Journal for the Study of Education and Development*, *39*(4), 772-811. doi: 10.1080/02103702.2016.1221055

Tartas, V., Perret-Clermont, A.-N., Marro, P., & Grossen, M. (2004). Interactions sociales et appropriation des stratégies par l'enfant pour résoudre un problème : quelles méthodes ? *Bulletin de Psychologie. Numéro special "Développement et fonctionnement : perspective historico-culturelle"*, *469*(57), 111-115.

Tiberghien, A. (1989a). Difficulté dans l'apprentissage de la physique : la structuration du monde matériel en physique et dans la vie quotidienne. In : N. Bednarz & C. Garnier (Eds.), *Construction des savoirs.* Ottawa : Editions d'agence d'ARC.

Tiberghien, A. (1989b). Phénomènes et situations matérielles : quelles interprétations pour l'élève et pour le physicien. In : N. Bednarz & C. Garnier (Eds.), *Construction des savoirs.* Ottawa : Editions d'agence d'ARC.

Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching - learning situations. *Learning and Instruction*, *4*, 71-87.

Tiberghien, A. (1997). Learning and teaching : Differentiation and relation. *Research in Science Education*, *27*(3), 359-382.

Tiberghien, A. (2002). Des connaissances naïves au savoir scientifique. *HAL*. https ://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000285. Consulté sur http://www.recherche.gouv.fr/recherche/aci/cognib.htm

Tiberghien, A. (2003). Des connaissances naïves au savoir scientifique. In : M. Kail & M. Fayol (Eds.), *Les sciences cognitives et l'école* (p. 353-413). Paris : Presses Universitaires de France.

Tiberghien, A. (2004). Causalité dans l'apprentissage des sciences. *Intellectica*, *38*(1), 69-102.

Tiberghien, A. (2007). Construction of students' knowledge in relation to a teaching sequence : hypotheses on learning and knowledge. In : *International symposium on the Guided Construction of Knowledge in Classrooms.* Jerusalem : Hebrew University.

Tiberghien, A. (2008). Students' conceptions : culturing conceptions. *Cultural Studies of Science Education*, *3*(2), 283-295.

Tiberghien, A., & de Vries, E. (1997). Relating characteristics of teaching situations to learner activities. *Journal of Computer Assisted Learning*, *13*, 163-174.

Tiberghien, A., Jossem, E. L., & Barojas, J. (Eds.). (1997). *Des Résultats de Recherche en Didactique de la Physique à la Formation des Maîtres*. International Commission on Physics Education.

Tiberghien, A., & Malkoun, L. (2007). Différenciation des pratiques d'enseignement et acquisitions des élèves du point de vue du savoir. *Education & Didactique*, *1*, 29-54.

Tiberghien, A., & Vince, J. (2002). Modeling in teaching and learning elementary physics. In : *The role of communication in learning to model.* Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Tiberghien, A., & Weil-Barais, A. (1987). Les modèles spontanés dans la pensée commune et enfantine. In : A. Giordan & J. Martinand (Eds.), *Actes JES 9* (p. 47-55).

Tina. (2003). Learning to understand the forms of causality implicit in scientifcally accepted explanations. *Studies in Science Education*, *39*, 1-74.

Todorov, T. (1981). *Mikhaïl Bakhtine : Le principe dialogique*. Paris : Editions du Seuil.

Tolmie, A., Howe, C., Mackenzie, M., & Greer, K. (1993). Task design as an influence on dialogue and learning : primary school group work with object flotation. *Social Development*, *2*(3), 183-201.

Toomela, A. (2007). Sometimes one is more than two : When collaboration inhibits knowledge construction. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *41*(2), 198-207.

Toomela, A. (2008). Variables in psychology : A critique of quantitative psychology. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *42*(3), 245–265.

Tourmen, C. (2011). Une introduction à la psychologie culturelle suivie de la lecture d'un ouvrage de jaan valsiner. *Travail et apprentissage*, *8*, 94-122.

Tozzi, M. (2002). *Penser par soi-même. Initiation à la philosophie*. Lyon : Chronique Sociale.

Treagust, D. F., & Duit, R. (2008). Conceptual change : a discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education. *Cultural Studies of Science Education*, *3*(2), 297-328.

Trevarthen, C., & Aitken, K. J. (2003). Intersubjectivité chez le nourrisson : recherche, théorie et application clinique. *médecine & hygiène*, *15*(4), 309-428.

Trognon, A. (1989). Usages de l'analyse des conversations. *Verbum*, *XII*(2), 133-150.

Trognon, A. (1995). Structures interlocutoires. *Cahiers de Linguistique Française*, *17*, 79-98.

Trognon, A. (1999). Eléments d'analyse interlocutoire. In : M. Gilly, J.-P. Roux, & A. Trognon (Eds.), *Apprendre dans l'interaction* (p. 69-94). Presses Universitaires de Nancy, Paris.

Trognon, A. (2001). Speech acts and the logic of mutual understanding. In : D. Vanderveken & S. Kubo (Eds.), *Essays in Speech Acts Theory.* Amsterdam/Philadelphia : John Benjamins.

Trognon, A., & Batt, M. (2003). Comment représenter le passage de l'intersubjectif à l'intrasubjectif ? essai de logique interlocutoire. *Orientation scolaire et professionnelle*, *32*(3), 399-436.

Trognon, A., Batt, M., B, S., Perret-Clermont, A., & Marro, P. (2006). Logique interlocutoire de la résolution en dyade d'un problème d'arithmétique. *Psychologie française*, *51*, 171-187.

Trognon, A., Batt, M., & Laux, J. (2011). Why is dialogical solving of a logical problem more effective than individual solving ? *Language and dialogue*, *1*(1), 44-78.

Trognon, A., Batt, M., Rebuschi, M., & Sorsana, C. (2010). Une approche des raisonnements émergeant de l'interlocution : la logique interlocutoire. *Pratiques*, *147/148*, 131-154.

Trognon, A., Batt, M., Schwarz, B., Perret-Clermont, A.-N., & Marro, P. (2003). L'apprentissage dans l'interaction. essai de logique interlocutoire. In : A. Herzig, B. Chaîb-Draa, & P. Math (Eds.), *Modèles formels de l'interaction. Actes des secondes journées francophones à Lille* (pp. 229–240). Toulouse : Editions Cepaduès.

Trognon, A., Batt, M., Schwarz, B., Perret-Clermont, A.-N., & Marro, P. (2004, 24, 25 et 26 mars). La logique interlocutoire permet-elle d'identifier les apprentissages défectueux ? In : *Actes du colloque international Arras "Faut-il parler pour apprendre ?".* Pas-de-calais, Arras, IUFM Nord.

Trognon, A., & Brassac, C. (1992). L'enchaînement conversationnel. *Cahiers de Linguistique Française*, *13*, 76-106.

Trognon, A., & Kostulski, K. (1996). L'analyse de l'interaction en psychologie des groupes : économie interne et dynamique des phénomènes groupaux. *Connexions*, *2*(68), 129-170.

Trognon, A., & Kostulski, K. (1999). Eléments d'une théorie socio-cognitive de l'interaction conversationnelle. *Psychologie Francaise*, *44*(4), 307-318.

Trognon, A., & Larrue, J. (1988a). Les représentations sociales dans la conversation. *Connexions*, *51*(1), 51-69.

Trognon, A., & Larrue, J. (1988b). L'énonciateur et son autre. *Revue internationale de psychologie sociale*, *1*(1), 51-69.

Trognon, A., & Saint-Dizier, V. (1999). L'analyse conversationnelle d'un malentendu : le cas d'un dialogue tutoriel. *Journal of Pragmatics*, *31*, 787-815.

Trognon, A., Sorsana, C., Batt, M., & Longin, D. (2008). Peer interaction and problem solving : One example of logical-discursive analysis of a process of joint decision making. *European Journal of Developmental Psychology*, *5*(5), 623-643.

Trowbridge, D. E., & McDermott, L. C. (1980). Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension. *American Journal of Physics*, *48*, 1120-1128.

Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, *59*(236), 433–460.

Ulloa, A. R. H. (2006). *Empirical investigation on children's nonmonotonic reasoning*. PhD thesis, Department of Educational Research, University of Lancaster, UK.

Valsiner, J. (1986). *The individual subject and scientific psychology*. New York : Plenum.

Valsiner, J. (1999). Eliminating pseudoempiricism from psychology : A return to science. *Scandinavian Journal Of Psychology*, *40*(1), 93-94.

Valsiner, J. (2005). Culture, development, and methodology in psychology : beyond alienation through data. *Cultural-historical Psychology*, *1-2*, 11-12.

Valsiner, J. (2007). *Culture in minds and societies*. New Dehli : Sage.

Valsiner, J. (2013). Preface : from ruptures to rich points : how education enables development. In : M. B. Ligorio & M. César (Eds.), *Interplays Between Dialogical Learning and Dialogical Self* (p. ix-xii). Charlotte, NC : Information Age Publisher.

van den Broek, H., Leerentveld, A., & van Schelven, D. (Eds.). (2013). *Dialogic Teaching*. DVD.

Van der Maren, J. (2003). La recherche scientifique et les recherches en éducation. In : *La recherche appliquée en pédagogie. Des modèles pour l'enseignement* (p. 15-38). Bruxelles : Editions De Boeck Université.

Van der Veer, R., & Valsiner, J. (1988). Lev vygotsky and pierre janet : on the origin of the concept of sociogenesis. *Developmental Review*, *8*, 52-65.

van Diggelen, W., Overdijk, M., & Andriessen, J. (2004, June 9-11). Constructing an argumentative map together : organizing principles and their application..

Van Geert, P. (1991). A dynamic systems model of cognitive and language growth. *Psychological Review*, *98*, 3-53.

Van Geert, P. (1994). *Dynamic systems of development. Change between complexity and chaos*. New York : Harvester.

Van Geert, P. (1998). A dynamic systems model of basic developmental mechanisms : Piaget, vygotsky and beyond. *Psychological Review*, *105*(5), 634–677.

Van Geert, P. (2003). Dynamic systems approaches and modeling of developmental processes. In : J. Valsiner & K. J. Conolly (Eds.), *Handbook of developmental Psychology* (p. 640-672). London : Sage.

Van Geert, P. (2018). The dynamics systems perspective. In : *Conference at the 48th Annual Meeting of the Jean Piaget Society, The Dynamics of Development : Process, (Inter-)Action, & Complexity, Amsterdam, The Netherlands.*

Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind*. Cambridge : MIT.

Verdonik, D. (2010). Between understanding and misunderstanding. *Journal of Pragmatics*, *42*, 1364-1379.

Vergnaud, G. (1985). Concepts et schèmes dans une théorie opératoire de la représentation. *Psychologie Francaise*, *30*(3/4), 245-251.

Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *2-3*, 133-170.

Vergnaud, G. (Ed.). (1994a). *Apprentissages et didactiques : où en est-on ?* Paris : Hachette livre.

Vergnaud, G. (1994b). Le raisonnement en physique et en mathématiques. *Psychologie Francaise*, *39*(2), 153-160.

Vergnaud, G. (1994c). Le rôle de l'enseignant à la lumière des concepts de schème et de champ conceptuel. In : M. Artigue, R. Gras, C. Laborde, & P. Tavignot (Eds.), *Vingt ans de didactique des mathématiques en France* (p. 177-194). Grenoble : La Penséée Sauvage.

Vergnaud, G. (1994d). Quelle théorie pour comprendre les relations entre savoir-faire et savoir ? In : A. Bentolila (Ed.), (p. 5-20). Paris : Nathan.

Vergnaud, G. (1996). La théorie des champs conceptuels. In : J. Brun (Ed.), *Didactique des mathématiques* (p. 197-241). Lausanne, Paris : Delachaux et Niestlé.

Vergnaud, G. (1999). On n'a jamais fini de relier vygotski et piaget. In : Y. Clot (Ed.), *Avec Vygotski* (p. 45-58). Paris : La Dispute.

Vergnaud, G. (2009a). *Qu'est-ce que apprendre ?* Texte remis à l'Institut de psychologie et éducation, Université de Neuchâtel.

Vergnaud, G. (2009b). The theory of conceptual fields. *Human development*, *52*, 83-94.

Vergnaud, G. (2015). Argumentation et conceptualisation : Commentaires. In : N. Muller Mirza & C. Buty (Eds.), *L'argumentation dans les contextes de l'éducation* (p. 383-392). Berne : Peter Lang.

Vergnaud, G., Halbwachs, F., & Rouchier, A. (1978). Structure de la matière enseignée, histoire des sciences et développement conceptuel chez l'élève. *Revue française de pédagogie*, *45*, 7-14.

Vergès, P. (1997). Réécriture : des objets de discours à l'argumentation. In : D. Miéville & A. Berrendonner (Eds.), *Logique, discours et pensée. Mélanges offerts à Jean-Blaise Grize.* (p. 169-182). Berne : Peter Lang.

Vergès, P. (2001). L'analyse des représentations sociales par questionnaire. *Revue Française de Pédagogie*, *42*(3), 537-561.

Vergès, P. (2010). Entretiens sociologiques au risque de la logique naturelle. *Travaux du Centre de Recherches Sémiologiques*, *68*, 99-166.

Verlet, L. (1993). *La malle de Newton*. Paris : Editions Gallimard.

Vermersch, P. (1976). *Une approche de la régulation de l'action chez l'adulte*. Thèse de doctorat, Académie de Paris, Université René Descartes.

Vermersch, P. (1994/2006). *L'entretien d'explicitation*. Paris : ESF Editeur.

Verret, M. (1974). *Le temps des études*. Thèse de doctorat, Paris V.

Viennot, L. (1978). Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. *Revue française de pédagogie*, *45*, 16-24.

Viennot, L. (1989a). Bilans de forces et loi des actions réciproques. analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, *83*(716), 951-971.

Viennot, L. (1989b). L'enseignement des sciences physiques, objet de recherche. *Bulletin de l'Union des Professeurs de physique et de chimie*, *83*(716), 899-910.

Viennot, L. (1989c). Obstacle épistémologique et raisonnement en physique : tendance au contournement des conflits chez les enseignants. In : N. Bednarz & C. Garnier (Eds.), *Construction des savoirs* (pp. 117–129). Ottawa : Les éditions Agence d'ARC.

Viennot, L. (1989d). Tendance à la réduction fonctionnelle : obstacle au savoir scientifique et objet de consensus. In : N. Bednarz & C. Garnier (Eds.), *Construction des savoirs* (pp. 84–92). Ottawa : Les éditions Agence d'ARC.

Viennot, L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, *1*, 13-27.

Viennot, L. (1996). *Raisonner en physique : la part du sens commun*. Paris : De Boeck Université.

Viennot, L. (1998). Faits expérimentaux et formes de raisonnement en thermodynamique. In : A. Tiberghien, E. L. Jossem, & J. Barojas (Eds.), *Des résultats de recherche en didactique de la physique à la formation des maîtres.* International Commission on Physics Education.

Viennot, L. (2007). La physique dans la culture scientifique : entre raisonnement, récit et rituels. *Aster*, *44*, 23-40.

Viennot, L. (2011). *En physique pour comprendre*. Les Ulis : EDP Sciences.

Vignaux, G. (1976). *L'argumentation*. Genève : Librairie Droz S.A.

Villani, A. (1992). Conceptual change in science and science education. *Science Education*, *76*(2), 223-237.

Vince, C., & Tiberghien, A. (2000). Simuler pour modéliser. *Sciences et techniques éducatives*, *2*, 333-366.

Vincent, H. (Ed.). (2013). Les représentations en question. *Recherches en Education*, *17*.

Von Aufschnaiter, C., Erduran, S., Osborne, J., & Simon, S. (2007). Arguing to learn and learning to argue : Case studies of how students' argumentation relates to their scientific knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, *45*(1), 101-131.

von Wright, G. H. (1971). On the logic and epistemology of the causal relation. In : E. Sosa & M. Tooley (Eds.), *Causation.* Oxford : Oxford University Press.

Vosniadou, S. (1991). Are we ready for a psychology of learning and culture ? *Learning and Instruction*, *1*, 283-287.

Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, *4*, 45–69.

Vosniadou, S. (2007). Conceptual change and education. *Human Development*, *50*, 47-54.

Vosniadou, S. (2008). Bridging culture with cognition : a commentary on "culturing conceptions : from first principles". *Cultural Studies of Science Education*, *3*, 277-282.

Vosniadou, S. (Ed.). (2013). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. London, New York : Routledge.

Vygotski, L. (1934/1997). *Pensée et langage*. Paris : La Dispute.

Vygotsky, L. (1934/1986). *Thought and Language* (Revised edition éd.). Cambridge, MA : The M.I.T. Press.

Vygotsky, L., & Luria, A. (1994). Tool and symbol in child development. In : R. Van der Veer & J. Valsiner (Eds.), *The Vygotsky Reader* (p. 99-174). Cambridge : Cambridge University Press.

Wagoner, B. (2009). The experimental methodology of constructive microgenesis. In : J. Valsiner, P. Molenaar, N. Chaudhary, & M. Lyra (Eds.), *Handbook of Dynamic Process Methodology in the Social and Developmental Sciences* (pp. 99–121). Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Wang, S.-h., Kaufman, L., & Baillargeon, R. (2003). Should all stationary objects move when hit ? developments in infants'causal and statistical expectations about collision events. *Infant Behavior & Development*, *26*, 529–567.

Watzlawick, P., Beavin, J. H., & Jackson, D. D. (1967/1972). *Une logique de la communication*. Paris : Editions du Seuil.

Wegerif, R. (2006). A dialogic understanding of the relationship between cscl and teaching thinking skills. international journal of computer supported collaborative learning. *International Journal of Computer Supported Collaborative Learning*, *1*(1), 143-157.

Wegerif, R. (2008). Dialogic or dialectic ? the significance of ontological assumptions in research on educational dialogue. *British Educational Research Journal*, *34*(3), 347-361.

Wegerif, R. (2011a). From dialectic to dialogic : A response to wertsch and kazak. In : T. Koschmann (Ed.), *Theories of Learning and Studies of Instructional Practice* (p. 201-222). Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer.

Wegerif, R. (2011b). Towards a dialogic theory of how children learn to think. *Thinking Skills and Creativity.*, *6*(3), 179-190.

Weigand, E. (1999). Misunderstanding : The standard case. *Journal of Pragmatics*, *31*, 763-785.

Weigand, E. (2017). *The Routledge Handbook of Language and Dialogue*. New York and London : Routledge.

Weil-Barais, A. (1993). *L'homme cognitif*. Paris : Presses Universitaires de France.

Weil-Barais, A., & Lemeignan, G. (1990). Apprentissage de concepts en mécanique et modélisation de situations expérimentales. *European Journal of Psychology of Education*, *V*(4), 391-416.

Weil-Barais, A., & Vergnaud, G. (1990). Students'conceptions in physics and mathematics biases and helps. In : J. Caverni, J.-M. Fabre, & M. Gonzalez (Eds.), *Cognitive biases* (p. 69-84). North Holland, Elsevier Science Publishers.

Weizman, E. (1999). Building true understanding via apparent miscommunication : A case study. *Journal of Pragmatics*, *31*, 837-846.

Welford, G., Osborne, J., & Scott, P. (1996). *Research in science education in Europe : current issues and themes* (Digital print éd.). London : Routledge Falmer.

Wells, G. (1999). *Dialogic Inquiry Towards a Sociocultural Practice and Theory of Education*. Cambridge : Cambridge University Press.

Wells, G. (2008). Learning to use scientific concepts. *Cultural Studies of Science Education*, *3*(2), 329-350.

Wertsch, J. V. (1989). Semiotic mechanisms in joint cognitive activity. *Infancia y A prendizaje*, *47*, 3-36.

Wertsch, J. V. (2008). From social interaction to higher psychological processes. *Human Development*, *51*(1), 69-79. doi: https://doi.org/10.1159/000112532

White, B. (1984). Designing computer games to help physics students understand newton's laws of motion. *Cognition and Instruction*, *1*(1), 69-108.

White, B. (1993). Thinkertools : Causal models, conceptual change, and science education. *Cognition and Instruction*, *10*(1), 1-100.

White, B., & Frederiksen, J. R. (1998). Inquiry, modeling, and metacognition : Making science accessible to all students. *Cognition and Instruction*, *16*(1), 3-118.

White, B., & Frederiksen, J. R. (2005). A theoretical framework and approach for fostering metacognitive development. *Educational Psychologist*, *40*(4), 211-223.

Wickman, P.-O., & Ostman, L. (2002). Learning as discourse change : A sociocultural mechanism. *Science Education*, *86*(5), 601 – 623.

Wilkening, F., & Huber, S. (2002). Childrens' intuitive physics. In : U. Goswami (Ed.), *Blackwell Handbook of Childhood Cognitive Development* (p. 349-370). Oxford, Cambridge : Blackwell Publishers.

Wilkening, F., & Lamsfuss, S. (1993). (miss-) konzepte der naiven physik im entwicklungsverlauf. In : K. Fiedler, G. Gigerenzer, & W. Hell (Eds.), *Kognitive Täuschungen* (pp. 271–290). Spektrum Verlag, Heidelberg.

Windisch, U. (1982). *Pensée sociale, langage en usage et logiques autres*. Lausanne : Editions L'age d'homme.

Winnykamen, F. (1990). *Apprendre en imitant ?* Paris : Presses Universitaires de France.

Winther, J. (2006). Modèles et modélisation dans l'enseignement des sciences physiques. *Le Bup*, *100*(884), 617-646.

Wittgenstein, L. (1953, 1958). *Philosophical Investigations*. Oxford : Blackwell.

Wozniak, R. H. (1975). A dialectical paradigm for psychological research : Implications drawn from the history of psychology in the soviet union. *Human Development*, *18*(1), 18-34.

Zakhartchouk, J.-M., & Castincaud, F. (1990). *Lecture d'enonces et de consignes*. Amiens : CRDP de Picardie.

Zapiti, A., & Psaltis, C. (2012). Asymmetries in peer interaction : The effect of social representations of gender and knowledge asymmetry on children's cognitive development. *European Journal of Social Psychology*(42), 578-588.

Zazzo, R. (1993). Le cheminement des découvertes de l'enfant de bârbel inhelder et guy cellerier. *Enfance*, *47*(3), 339-344.

Zeidler, D. L., Osborne, J., Erduran, S., Simon, S., & Monk, M. (2003). The role of argument during discourse about socioscientific issues. In : D. L. Zeidler (Ed.), *The Role of Moral Reasoning on Socioscientific Issues and Discourse in Science Education* (p. 97-116). Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers.

Zimbardo, P. G. (2007). *The Lucifer Effect : Understanding How Good People Turn Evil*. New York : Random House.

Zimbardo, P. G., & White, G. (1971). *Stanford prison experiment : a simulation study of the psychology of imprisonment* (Rapport technique). Stanford University, California.

Zittoun, T. (2013). Modalités d'usages de connaissances et sphères d'expérience. In : J.-P. Bernié & M. Brossard (Eds.), *Vygotski et l'école. Apports et limites d'un modèle théorique pour penser l'éducation et la formation* (p. 251 262). Presses Universitaires de Bordeaux : Pessac (FR).

Zittoun, T., Gillespie, A., Cornish, F., & Psaltis, C. (2007). The metaphor of the triangle in theories of human development. *Human Development*, *50*(4), 208-229.

Zittoun, T., & Iannaccone, A. (Eds.). (2014). *Activities of Thinking in Social Spaces.* New York : Nova Science Publishers Inc.

Zittoun, T., & Perret-Clermont, A.-N. (2009). Four social psychological lenses for developmental psychology. *European Journal of Psychology of Education*, *24*(3), 387-403.

Zittoun, T., Perret-Clermont, A.-N., & Carugati, F. (1997). Note sur la notion de conflit socio-cognitif. *Cahiers de Psychologie (Université de Neuchâtel)*, *33*(Université de Neuchâtel), 27–30.

Le malentendu lui-même est donc une chose qui se révélera. Le malentendu lui-même est toujours pour demain, il n'est donné dès aujourd'hui que pour le psychologue et le sociologue, habiles à déchiffrer la mésentente secrète au fond de l'entente. Ce n'est pas la moindre ironie de la condition humaine qu'il puisse y avoir un bon usage de cette mésintelligence si bien entendue ! Les hommes sont faibles, méchants et misérables au point qu'il vaut peut-être mieux, s'ils doivent s'accorder entre eux, qu'ils ne se comprennent pas les uns les autres… Y aurait-il par hasard plus à redouter qu'à espérer de la dissipation des malentendus ?

(Jankélévitch, 1957, p. 164)

Quatrième partie

Annexes

Annexe A

Glossaire

activité : ensemble ou système des conduites concrètes et des processus psychiques en cours à un moment particulier pour une personne ou un groupe de personnes engagées dans l'effectuation d'actions plus ou moins coordonnées en fonction d'une finalité. L'activité humaine est toujours finalisée (pour une *théorie de l'activité*, voir p.ex. Leontiev, 1975/1984), et la finalité d'une activité dépend du point de vue considéré.

concept : un (ensemble de) terme(s) résultant des "usages techniques et scientifiques de la langue" (Grize, 1996, p. 48), usages qui se distinguent de l'usage quotidien par le fait qu'ils obéissent à des règles d'usage, précisées dans des définitions qui tendent à l'exactitude, sans pourtant jamais l'atteindre totalement puisque leurs définitions font elles aussi usage de *notions* avec le flou qui les entoure. Pour Grize, la particularité d'une langue technique et scientifique consiste à permettre "d'y raisonner *more geometrico*" (*ibidem*). Un *concept* n'est jamais isolé : il n'est *concept* qu'en référence à une *théorie* au sein de laquelle il est en relation avec d'autres *concepts*.

connaissance (sing.) : la possibilité ou faculté humaine de connaître, au sens de l'épistémologie génétique [655] (voir les entrées **connaissance (sing. *ou* pl.)** et **savoirs**).

connaissance(s) (sing. *ou* pl.) : les habitudes, conduites, significations, systèmes sémiotiques, etc. et leurs relations, que s'est approprié un individu au cours de sa vie (voir les entrées **connaissance (sing.)** et **savoirs**).

655. Les termes français de *savoir* et *connaissance* sont indifférenciés en anglais, où l'on ne dispose que du terme *knowledge*, ce qui n'est pas sans poser des problèmes de traduction. La didactique française (voir p.ex. : Astolfi, 1992 ; Tiberghien, 2008) utilise le terme *les connaissances* pour désigner les connaissances acquises par les élèves - que ce soit des représentations mentales ou autre chose - et le terme *les savoirs* pour désigner la connaissance culturellement instituée, ou comprise abstraitement comme l'expression de significations dans un ou plusieurs langages. Par contre, les termes *connaissance* et *savoir* prennent un sens inverse dans les écrits de Jean Piaget et ceux de nombreux piagétiens après lui, c'est-à-dire que *les savoirs* désignent les acquis d'un apprenant, propriété d'une personne individuelle, et *les connaissances* désignent l'ensemble ou respectivement quelques connaissances culturellement instituées. Piaget, qui s'intéressait surtout à *la faculté de connaître*, c'est-à-dire à *la possibilité de la connaissance* chez l'être humain, utilise aussi le terme *la connaissance* pour faire référence à cette *possibilité* ou *fonction* psychique, sans alors se référer à un quelconque contenu de connaissance particulier. Comme nous sommes confrontés aux deux usages dans nos références, il est nécessaire de choisir : j'ai opté pour la terminologie de la didactique francophone, plus actuelle, et ce malgré la proximité du sens piagétien avec le sens commun. En effet, en français courant il s'agit pour une personne de "*savoir* quelque chose ou non", indépendamment de fait que c'est un fait "*connu*" par ailleurs, dans la culture ou communauté d'appartenance. Autrement dit, les définitions usuelles donnent pour *savoir* le sens de "avoir en mémoire" (wiktionary.org), ou "ensemble de connaissances *acquises*" (Petit Larousse, 1976, p. 928, mise en évidence par l'auteur), alors que *connaissance* fait référence à la faculté de connaître et/ou à des contenus déterminé indépendamment de celles et ceux qui les ont acquis, par exemple des "idées" ou des "notions" (mêmes sources). Je me conforme néanmoins à l'usage des sciences de l'éducation, qui ont pris le contre-pied de cet usage vernaculaire.

enquête : selon la définition de Dewey (1938/1993) "la transformation contrôlée ou dirigée d'une situation indéterminée en une situation si déterminée en ses distinctions et relations constitutives qu'elle convertit les éléments de la situation originelle en un tout unifié" (cité par Go, 2013, p. 68).

interprétation : processus qui consiste, pour une personne, à donner du sens à un élément de son milieu (événement, conduites, traces sémiotiques, etc.) en fonction de ses connaissances, de son histoire, de la situation, des préconstruits culturels, etc. "Donner du sens" fait référence ici à une attribution de signification qui est assimilation de l'action à des connaissances antérieures du sujet connaissant, et ne se résume pas au traitement d'informations ou de données ; elle est notamment aussi le plus souvent attribution de valeurs (voir p.ex. : Inhelder et al., 1992, pp.34-35), évocation émotionnelle ou sentimentale, etc.

moment : délimitation temporelle significative d'un point de vue et dans une situation, qui forme l'unité temporelle permettant l'analyse d'un processus. La référence au temps se fait plutôt ici au sens du *kaïros*[656] - c'est-à-dire de l'occasion, du bon moment - que du *chronos* - le déroulement temporel, le temps qui passe : ce n'est pas tant l'*intervalle* qui importe pour le concept de *moment*, que l'*unité* qui constitue une *totalité signifiante* dans le déroulement de l'activité, dans le processus de pensée ou de construction d'un discours, et qui permet de les décrire et de les comprendre.

notion : un (ensemble de) terme(s) dans son usage de la langue quotidienne, caractérisée par le fait qu'elle est toujours entourée d'une zone de flou, n'étant que partiellement déterminée, et "qu'il est possible de considérer des voisinages entre elles" (Grize, 1996, p. 47), dans "un sens assez large pour englober la métaphore" (*ibidem*).

notion primitive : "systèmes de représentations complexes de propriétés physico-culturelles" selon la définition de Culioli (cité par Grize, 1996, p. 82), où l'on retrouve cette double composante perceptive et culturelle ; elle est proche de ce que Piaget nommait "image mentale".

perspective : construction théorique explicite et argumentée permettant d'orienter le point de vue des personnes qui se prête au jeu, et de partager entre plusieurs personnes un point de vue (partiellement) commun sur des phénomènes (pour une définition plus précise, voir p.ex. Kohler, 2018). Pour un exemple, voir l'épilogue qui décrit brièvement, à l'aide des travaux de Koyré (1966, 1968), la perspective newtonienne en physique.

point de vue : "regard" porté part une personne ou un groupe de personne, comprenant à la fois le *point* d'origine à partir duquel le regard est porté (biographie, expérience antérieure, appartenances, etc.), l'*orientation* du regard (dont des éléments téléologiques comme des finalités et intentions) et sa *focalisation* (échelon d'observation, sélection des indices pertinents, etc.), son *éclairage* relatif aux valeurs et sentiments, et des composants d'ordre cognitif permettant la coordination de l'ensemble, comme le *cheminement de pensée* et le *raisonnement* (pour une discussion de ce concept chez Piaget, et des développements qu'il reste à construire, voir p.ex : Mounoud, 2000).

référentiel épistémique : système constitué des relations (de conformité) entre les points de vue de différents acteurs visant à partager un savoir commun ; par analogie avec le *référentiel d'inertie*

656. Jankélévitch (1957) propose même une science du *bon moment*, de l'*occasion chanceuse*, une "*kaïrologie*" (p. 109).

en physique qui permet d'évaluer le mouvement des corps dans un tel référentiel (sens, direction, vitesse, accélération etc.), le référentiel épistémique permet d'évaluer la divergence entre des points de vue dans un système de savoirs, où ces points de vue sont orientés vers la construction d'une intercompréhension (pour plus de détails, voir section 2.3.1.4, p. 71).

savoirs : les relations, processus ou formes sociales et culturelles (souvent langagières) permettant aux individus de reconnaître, de s'approprier et de communiquer des connaissances en se reposant sur la mémoire collective de la société (voir les entrées **connaissance (sing.)** et **connaissance (sing. *ou* pl.)**) ; dans cette recherche, des distinctions plus fines (voir section 2.3.1.2, p. 64) ont été utiles pour le milieu scolaire, entre *savoirs enseignés* (notamment les schématisations effectivement construites ou présentes en classe), *savoirs à enseigner* (notamment les schématisations de référence que les enseignants sont institutionnellement tenus de présenter aux élèves), et *savoirs savants* (notamment les schématisations présentes dans la littérature académique ou scientifique de référence).

signification : la dimension consensuelle ou culturelle du sens qu'une personne donne généralement à un même signifiant dans une communauté linguistique (ou autre), entendu au sens de la théorie du signe de Grize (1996) (pour plus de détails, voir section 3.3.5.1, p. 194).

situation : un ensemble ou système limité (mais ouvert) du milieu (matériel, social, culturel, temporel, etc.) dans lequel se trouve(nt) engagé(s) une ou plusieurs personnes au cours de leur activité. La *situation indéterminée* est le référent commun de plusieurs points de vue, mais il va de soi que la *détermination* d'une *situation* - que ce soit pour la délimiter au sein d'un ensemble plus vaste ou pour lui attribuer des qualités - dépend et varie selon le point de vue. Ainsi, plusieurs personnes regroupées dans une même *situation indéterminée* lui donne du sens de manière diverse, et construisent de multiples *situations déterminées*.Du point de vue du chercheur, sur le plan méthodologique, la *situation* est le *cas* tel qu'il a été défini pour la question de recherche, c'est-à-dire dans cette recherche l'unité [657] permettant de répondre au cours d'une *enquête* à la question "y a-t-il malentendu ou non ?".Sur le plan théorique, dans une épistémologie constructiviste et interactionniste conçue comme une dynamique des systèmes ouverts, la *situation indéterminée* prend le statut d'un *agrégat*, selon la définition de Le Moigne, 1977/2006, p. 23. Elle regroupe "les éléments à considérer" (*ibidem*). Le terme *situation* se comprend dans ce cadre épistémologique comme les *constellations* des astronomes, mais à la différence qu'en sciences humaines la *situation* est, en plus, éphémère, voire évanescente. Le Moigne, 1977/2006, pp. 44-45 présente l'importance de la *représentation* dans le travail scientifique, pour ce cadre épistémologique, et cite aussi l'idée de "situation signifiante" de Ladrière. Ce lien que j'établis entre Dewey, d'une part, et la théorie des systèmes dynamiques, de l'autre, permet de considérer la *situation indéterminée* comme quelque chose qui *se noue* et peut se *dénouer* d'un certain point de vue en *situation déterminée*, d'une part, et comme une *situation indéterminée* identifiée et définie en référence à un système, d'autre part, qui permet une référence "objective" et m'a permis, par exemple, de considérer que le concept de *situation* constitue

657. Au sens du plus petit ensemble permettant l'étude du phénomène choisi, voir la réflexion effectuée à partir de Vygotski à la section 3.2.10, p. 149.

un *échelon* dans l'échelle d'observation de la psychologie [658], comme la cellule constitue un échelon en biologie organique, tout en pouvant se *déterminer* en cellule d'oignon, cellule dégénérative, etc. Au moment où la cellule étudiée par le biologiste est identifiée comme une cellule d'oignon, la situation *se noue* du point de vue du chercheur - c'est désormais pour lui une *situation déterminée* -, et elle pourrait même *se dénouer* si, par exemple, un collègue venait à lui faire remarquer qu'il s'est trompé lors de son identification. Dans ce cas, les deux collègues doivent d'abord se mettre d'accord qu'il examine bien la même situation, qu'ils se réfère à la même *situation indéterminée* - au sens objectif de *l'agrégat* cette fois, c'est-à-dire qu'ils prennent les mêmes "éléments à considérer". Cette dimension subjective de la *situation* n'empêche pas de considérer qu'il puisse y avoir, avec le consensus des collègues, une *situation déterminée* à un certain degré d'objectivité au terme de la procédure scientifique : ils *se mettent d'accord* sur le fait que ce n'est pas une cellule d'oignon.Selon la présente définition, les situations spécifiées par des cadres théoriques particuliers, comme les *situations didactiques* et *adidactiques* de Brousseau (1998/2004), peuvent être assimilée à des *situations déterminées* d'un certain type, que la théorie en question détermine. C'est ce que j'ai fait pour les *situations de malentendu*, en spécifiant la perspective théorique permettant de mener une enquête pour déterminer de telles *situations* en "*de malentendu*". D'autres situations dont il est question dans la littérature, par contre, font plutôt référence aux *situations indéterminées* : c'est le cas par exemple des situations auxquelles s'applique (ou non) un schème, dans la théorie de l'apprentissage conceptuel de Vergnaud (1990), car c'est la dimension "objective", *ante*-interprétation d'un point de vue particulier, qui est désignée dans ce cas. Une situation, en tant qu'échelon d'observation ou en tant que *situation indéterminée objective* [659], regroupe un ensemble de composants [660] :

1. Une *matérialité* de la situation comprend ses aspects physique et concrets, tels que la disposition des objets, l'occupation de l'espace et son arrangement, et tout autre élément de ce genre.

2. De *l'activité*, telle qu'elle est mise en œuvre par les acteurs (pris dans l'ensemble [661]), et comprenant des processus pragmatiques et des processus sociaux d'influence, mais également des statuts, des rôles, des attentes, etc. Ces processus ou phénomènes sociaux sont situationnels s'ils sont actualisées dans et par la situation. Perret-Clermont et Carugati (2004) discute de leur articulation avec le cognitif (individuel) et la question de l'apprentissage à l'école.

658. La réflexion philosophique sur l'importance des *situations* dans une ontologie pour les sciences humaines remonte au moins au mouvement *situationniste* du $XX^{ème}$ siècle, dont on trouve aujourd'hui encore la trace culturelle autour des *happening*, notamment dans le militantisme. Plus récemment, les processus historiques, culturels et psychosociaux constitutif d'une *situation* fait l'objet de recherches spécifiques (voir par exemple Park & Moro, 2006), mettant notamment en évidence la dynamique d'interprétation, par les acteurs impliqués, qui est constitutive des situations. Ces réflexions m'ont conduit à émettre l'hypothèse (philosophique) que l'interprétation est un *acte créateur* (Kohler, 2014a) : créateur de *situations*, et notamment de *situations de malentendu*, ou d'autres genres de situations. Selon cette idée, la *liberté humaine* serait (au moins) *liberté d'interprétation* du monde qui l'entoure, du milieu matériel, social, culturel, symbolique, etc.

659. Si le terme "objectif" suscite l'incompréhension, on peut assez facilement le remplacer dans mes propos par "à considérer", ou encore "avant interprétation".

660. Cette liste n'est sans doute pas exhaustive.

661. Il ne s'agit pas ici de l'activité individuelle, justement, mais d'une activité précisément situationnelle en ce qu'elle ne se réduit pas à la somme des activités individuelles, comme "jouer au football", qui n'a de sens que si l'*ensemble* des activités individuelles telles que "tirer le ballon" ou "attendre" sont considérées comme un *tout*, et non en tant qu'activités strictement individuelles. Attendre près du but, par exemple, n'aurait aucun sens sans considérer l'ensemble du jeu de football. Qui peut jouer au football seul, sans terrain, sans ballon etc. ?.

3. Une *historicité* propre à la situation elle-même, offrant aux acteurs la possibilité de se référer à une histoire commune ou partagée, et cela quand bien même le vécu individuel des acteurs demeure singulier. La situation a sa propre histoire, permettant un ancrage dans des souvenirs communs (axe du passé) et l'anticipation de son déroulement (axe du futur), typiquement lors de *routines*[662]. [663].

4. Une *significativité*[664], à savoir le sens que prend potentiellement la situation pour les acteurs qui y participent, articulant la situation aux structures cognitives individuelles par un potentiel symbolique.

5. Une *contextualité* qui localise la situation dans un cadre du cadre, une tradition culturelle, un champ socio-culturel qui sont englobant et, par conséquent, fonctionnent comme références pour les processus d'interprétation de la situation (sa *significativité*), la définition des rôles, etc. Cette *contextualité* de la situation permet aux individus de la spécifier, d'une part, et d'autre part de se reposer sur des *invariants*, valables dans de vastes ensembles de situations.

tâche : ensemble ou système d'actions à réaliser, selon Leontiev "un but donné dans des conditions déterminées" (1976, cité par Leplat & Hoc, 1983, p. 51), et dont on peut distinguer la *tâche prescrite* - p.ex. ce qui est attendu de l'élève du point de vue de l'enseignant - de la *tâche effective* - p.ex. celle que l'élève réalise selon ce qu'il en a assimilé de son point de vue. En milieu scolaire, la tâche est communiqué par une consigne écrite, orale, ou par les deux à la fois, et par l'ensemble du milieu didactique qui contribue à son interprétation par l'élève, lorsque celui-ci prend à sa charge le travail qui lui est proposé, au cours d'un processus dénommée *dévolution* par Brousseau (1998/2004). Ce processus est sujet à des négociations plus ou moins implicites (pour des descriptions de *stratégies d'élèves*, voir p.ex. : Perrenoud, 1994/1995).

transdisciplinaire : intégration dans une seule perspective des apports de plusieurs disciplines à l'étude d'un objet de recherche, dont l'étude "traverse" les disciplines constituées au gré de ses besoins. Il s'agissait pour Piaget d'une vision de la science *à venir*, qu'il appelait de ses vœux en ces termes : "Enfin, à l'étape des relations interdisciplinaires, on peut espérer voir succéder une étape supérieure qui serait "transdisciplinaire", qui ne se contenterait pas d'atteindre des interactions ou réciprocités entre recherches spécialisées, mais situerait ces liaisons à l'intérieur d'un système total sans frontières stables entre les disciplines." (Piaget, 1972b, p. 170).

662. Les routines, telles qu'elles sont étudiées en psychologie (voir p. ex. : Corsaro, 1990), se situe à cet échelon situationnel et leur historicité apparaît essentiel à leur fonctionnement.

663. Le modèle d'*équifinalité* développé en psychologie culturelle (Valsiner, 2007) pourrait fournir une théorisation convaincante de cette dimension, mais il n'a pas été utilisé dans cette recherche, d'une part parce que ce modèle a été publié après la mise en œuvre de la partie empirique de cette recherche et que les traces recueillies auraient dû en tenir compte, et d'autre part parce les outils d'analyse nécessite encore quelque développement pour pouvoir aborder dans toute leur complexité des situations en milieu naturel.

664. Le concept plus connu d'*affordance* (Gibson, 1977) donne parfois l'impression d'une détermination par la situation des significations, une lecture fautive de l'auteur à mon humble avis, qui m'a conduit à préférer *significativité* pour souligner qu'il ne s'agit, somme toute, que de potentialités données par la situation, jamais de causalité.

Annexe B

Documents scolaires

Sommaire

B.1 Exercices pour le logiciel *Marbles Move* . . . 803
B.1.1 Essais pilote en deux versions . . . 803
B.1.2 Éléments du dispositif d'enseignement mi-fini (version A) . . . 807
B.1.3 Éléments du dispositif d'enseignement mi-fini (version B) . . . 812
B.2 Éléments de la séquence d'enseignement planifiée . . . 817
B.2.1 Questionnaire pré-séquence élaboré par l'enseignant . . . 817
B.2.2 Questionnaire post-séquence élaboré par l'enseignant . . . 821
B.3 Objectifs et programme scolaire en physique . . . 827
B.4 Polycopiés de cours utilisés par la classe étudiée . . . 831
B.4.1 Cours intitulé "cinématique" . . . 831
B.4.2 Cours intitulé "mouvement circulaire uniforme" . . . 838
B.4.3 Cours intitulé "travail et énergie" . . . 841
B.4.4 Cours intitulé "les lois de la dynamique" . . . 854

B.1 Exercices pour le logiciel *Marbles Move*

B.1.1 Essais pilote en deux versions

Les figures (ci-dessous) présentent les documents utilisés avec les élèves lors des essais pilotes.

20.06.2006

COLLISIONS ENTRE BILLES 3AVEC

Lors d'une enquête, nous avons demandé aux personnes interrogées une explication de la collision entre deux billes. Parmi les réponses données, nous trouvons les deux explications suivantes :

1) « Lorsqu'une bille en mouvement heurte une bille au repos, les billes exercent l'une sur l'autre une action d'égale intensité, de même direction et de sens opposé. Une bille poursuit sa course à vitesse constante, à moins qu'une action extérieure ne s'exerce sur elle. »

Qu'en pensez-vous ? (cocher une seule case par ligne s'il vous plaît)

	d'accord	plutôt d'accord	neutre	plutôt pas d'accord	pas d'accord
Cette explication est correcte.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est simpliste.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est fausse.	☐	☐	☐	☐	☐

2) « Lorsqu'une bille en mouvement heurte une bille au repos, elle la pousse en lui transmettant de l'élan. Une bille poursuit sa course tant qu'elle a de l'élan. »

Qu'en pensez-vous ? (cocher une seule case par ligne s'il vous plaît)

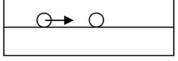
	d'accord	plutôt d'accord	neutre	plutôt pas d'accord	pas d'accord
Cette explication est correcte.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est simpliste.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est fausse.	☐	☐	☐	☐	☐

Voici trois situations de collisions entre billes. Nous vous prions de répondre à toutes les questions au plus près de votre opinion, et sans y passer trop de temps.

Situation 1 :

« Une bille roule sur une surface plane, et vient en heurter un autre au repos, en tout point identique (fig.1). Les schémas ci-dessous représentent l'emplacement des deux billes un cours instant après le choc. Les flèches désignent la direction de leur mouvement.»

Figure 1 : avant le choc



Selon vous, quelle est la bonne réponse ? Figure n° .....

Figure 2 : après le choc

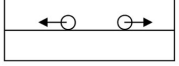


Figure 3 : après le choc

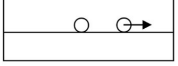


Figure 4 : après le choc

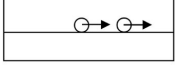


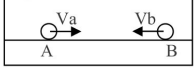
FIGURE B.1 – Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 1), situations et explications - page 1.

20.06.2006

Situation 2 :

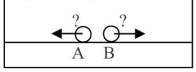
« Deux billes identiques A et B roulent à des vitesses différentes (Va et Vb) l'une vers l'autre, et s'entrechoquent (fig. 5). »

Figure 5 : avant le choc



Quelle sera la vitesse de la bille A après le choc (fig. 6) ? .....

Figure 6 : après le choc



Situation 3 :

« Dans le dispositif suivant, une bille descend le long d'une pente, puis roule sur une surface plane jusqu'à heurter une rangée de deux billes au repos et identiques à la première (fig. 7). »

Que se passe-t-il après le choc ?

Dessiner la position indicative des billes à la fin de leur mouvement sur le schéma (figure 8).

Figure 7 : avant le choc

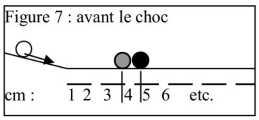
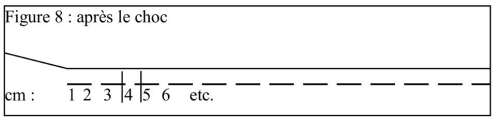


Figure 8 : après le choc



Questions générales :

Que pensez-vous des affirmations suivantes ? (cocher une seule case par ligne s'il vous plaît)

	d'accord	plutôt d'accord	neutre	plutôt pas d'accord	pas d'accord
L'élan avec lequel la bille est lancée après le choc diminue au fur et à mesure qu'elle avance.	☐	☐	☐	☐	☐
Toutes les billes retournent à leur état naturel, au repos, après un certain temps	☐	☐	☐	☐	☐
La vitesse d'une bille en mouvement horizontal est constante si on néglige le frottement.	☐	☐	☐	☐	☐
Une bille immobile n'est soumise à aucune force.	☐	☐	☐	☐	☐

Remarques, commentaires :

_____

_____

_____

FIGURE B.2 – Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 1), situations et explications - page 2.

23.06.2006

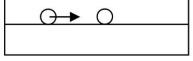
COLLISIONS ENTRE BILLES

Voici trois situations de collisions entre billes.

Situation 1 :

« Une bille roule sur une surface plane, et vient en heurter un autre au repos, en tout point identique (fig.1). Les schémas ci-dessous représentent l'emplacement des deux billes un cours instant après le choc. Les flèches désignent la direction de leur mouvement.»

Figure 1 : avant le choc



Selon vous, quelle est la bonne réponse ? Figure n° ……

Figure 2 : après le choc

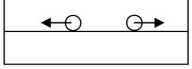


Figure 3 : après le choc

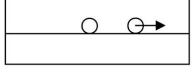
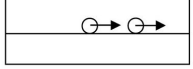


Figure 4 : après le choc



Situation 2 :

« Dans le dispositif suivant, une bille descend le long d'une pente, puis roule sur une surface plane jusqu'à heurter une rangée de deux billes au repos et identiques à la première (fig. 7). »

Que se passe-t-il après le choc ?

Dessiner la position indicative des billes à la fin de leur mouvement sur le schéma (figure 8).

Figure 7 : avant le choc

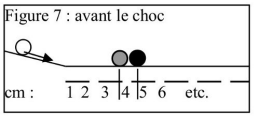
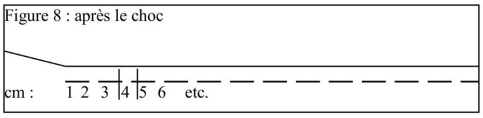


Figure 8 : après le choc



Situation 3 :

« Deux billes identiques A et B roulent à des vitesses différentes (Va et Vb) l'une vers l'autre, et s'entrechoquent (fig. 5). »

Quelle sera la vitesse de la bille A après le choc (fig. 6) ? ……

Figure 5 : avant le choc

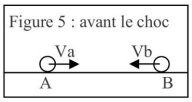


Figure 6 : après le choc

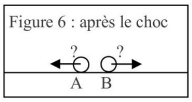


FIGURE B.3 – Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 2), situations.

23.06.2006

Considérer les deux explications ci-dessous et donner votre avis :

1) « Lorsqu'une bille en mouvement heurte une bille au repos, les billes exercent l'une sur l'autre une action d'égale intensité, de même direction et de sens opposé. Une bille poursuit sa course à vitesse constante, à moins qu'une action extérieure ne s'exerce sur elle. »

Qu'en pensez-vous ? (cocher une seule case par ligne s'il vous plaît)

	d'accord	plutôt d'accord	neutre	plutôt pas d'accord	pas d'accord
Cette explication est correcte.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est simpliste.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est fausse.	☐	☐	☐	☐	☐

2) « Lorsqu'une bille en mouvement heurte une bille au repos, elle la pousse en lui transmettant de l'élan. Une bille poursuit sa course tant qu'elle a de l'élan. »

Qu'en pensez-vous ? (cocher une seule case par ligne s'il vous plaît)

	d'accord	plutôt d'accord	neutre	plutôt pas d'accord	pas d'accord
Cette explication est correcte.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est simpliste.	☐	☐	☐	☐	☐
Cette explication est fausse.	☐	☐	☐	☐	☐

De votre côté, comment expliqueriez-vous le phénomène ?

_____

_____

_____

_____

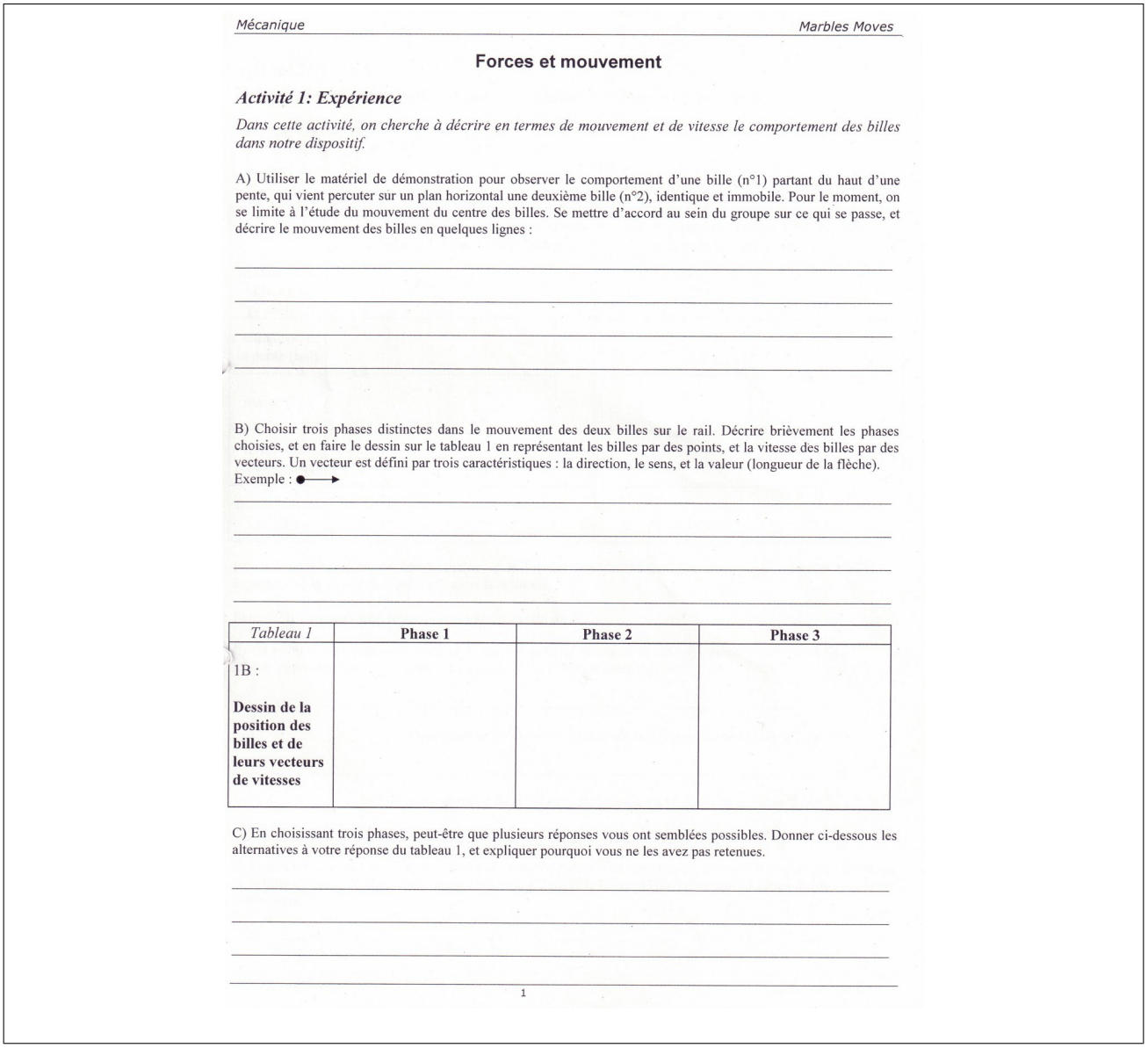
_____

_____

_____

FIGURE B.4 – Essais pilote : questionnaire sur les collisions (version 2), explications.

B.1.2 Éléments du dispositif d'enseignement mi-fini (version A)



Mécanique *Marbles Moves*

Forces et mouvement

Activité 1: Expérience

Dans cette activité, on cherche à décrire en termes de mouvement et de vitesse le comportement des billes dans notre dispositif.

A) Utiliser le matériel de démonstration pour observer le comportement d'une bille (n°1) partant du haut d'une pente, qui vient percuter sur un plan horizontal une deuxième bille (n°2), identique et immobile. Pour le moment, on se limite à l'étude du mouvement du centre des billes. Se mettre d'accord au sein du groupe sur ce qui se passe, et décrire le mouvement des billes en quelques lignes :

B) Choisir trois phases distinctes dans le mouvement des deux billes sur le rail. Décrire brièvement les phases choisies, et en faire le dessin sur le tableau 1 en représentant les billes par des points, et la vitesse des billes par des vecteurs. Un vecteur est défini par trois caractéristiques : la direction, le sens, et la valeur (longueur de la flèche).
Exemple : ●⟶

Tableau 1	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 3**
1B : **Dessin de la position des billes et de leurs vecteurs de vitesses**			

C) En choisissant trois phases, peut-être que plusieurs réponses vous ont semblées possibles. Donner ci-dessous les alternatives à votre réponse du tableau 1, et expliquer pourquoi vous ne les avez pas retenues.

1

FIGURE B.5 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 1.

Activité 2: Analyser

Dans cette activité, on s'intéresse à l'influence des différentes variables sur la vitesse des billes.

A) Utiliser le matériel de démonstration et le logiciel Marbles Moves pour déterminer quelle(s) variable(s) influence(nt) la vitesse de la bille n°1 avant le collision.

Reporter les résultats dans la première colonne du tableau 2.

Variable	**Description de l'influence sur la vitesse de la bille n°1 avant la collision**	**Description de l'influence sur la vitesse de la bille n°2 après la collision**
hauteur de la bille sur la pente (m)		
inclinaison de la pente (rad)		
masse (kg)		
nombre de billes (unités)		
frottement du sol (N)		

B) Utiliser le matériel de démonstration et le logiciel Marbles Moves pour déterminer quelle(s) variable(s) influence(nt) la vitesse de la bille n°2 après le collision.

Reporter les résultats dans la deuxième colonne du tableau 2.

C) En l'absence de frottement, quel est le rapport entre la vitesse de la bille n°1 avant le choc, et la vitesse de la bille n°2 après le choc : - quand la masse des deux billes est égale (M_1=M_2') ?

_____

- quand la masse de la bille n°1 est supérieure à la masse de la bille n°2 (M_1>M_2') ?

_____

- quand la masse de la bille n°1 est inférieure à la masse de la bille n°2 M2<M1 ?

_____

D) Que faut-il en conclure ? Tenter d'écrire une formule générale ou une phrase exprimant le rapport entre la vitesse de la bille n°1 avant le choc et la vitesse de la bille n°2 après le choc, qui prenne en considération la(les) variable(s) pertinente(s).

_____

_____

FIGURE B.6 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 2.

Activité 3 : Description en grandeurs physiques du mouvement

Dans cette activité, on s'intéresse aux forces exercées sur les billes au cours de leur déplacement.

A) Il s'agit à présent de décrire le mouvement de la bille n°1 en grandeurs physiques, au cours des trois phases. Dessiner dans le tableau 3 un point qui représente la bille n°1, et un vecteur qui représente la vitesse de la bille. Pour l'instant, on néglige le frottement.

B) Préciser ensuite si cette vitesse est constante ou non, et dessiner le vecteur représentant l'accélération de la bille. Pour l'instant, on néglige le frottement.

C) Reprendre les points 3A) et 3B) du tableau 3 en tenant compte de la force de frottement, et comparer les résultats. Quel est l'influence de la force de frottement sur l'accélération et sur la vitesse de la bille ? Dessiner le vecteur de la force de frottement F_f à la dernière ligne du tableau 3.

Tableau 3 *sans force de frottement*	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 3**
1B : **Dessin de la position des billes (rappel)**			
3A : **Vecteur représentant la vitesse de la bille n°1, représentée par un point**			
3B : **Est-ce que la vitesse est constante ? Sinon, est-ce que la bille accélère ou décélère ?**	_____ _____	_____ _____	_____ _____
avec force de frottement 3C : **Vecteur représentant l'accélération de la bille n°1, représentée par un point**			
avec force de frottement 3C : **Vecteur représentant la force de frottement exercée par le sol sur la bille n°1**			

FIGURE B.7 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 3.

Activité 4 : Description de changement d'état à l'aide des forces

Dans cette activité, on s'intéresse aux forces exercées sur les billes au cours de leur déplacement.

A) Dans l'activité 3, la force de frottement permet d'expliquer la décélération de la bille n°1 au cours de son déplacement horizontal. Lorsque l'on ne tient pas compte du frottement, la vitesse de la bille n°1 est constante. En s'inspirant du rôle de la force de frottement dans ce mouvement horizontal, essayer de répondre à la question suivante :

Quelles forces faut-il ajouter à notre description du mouvement pour expliquer l'accélération de la bille n°1 au cours des 3 phases ? Représenter les forces exercées sur la bille n°1 par des vecteurs dans le tableau 4.

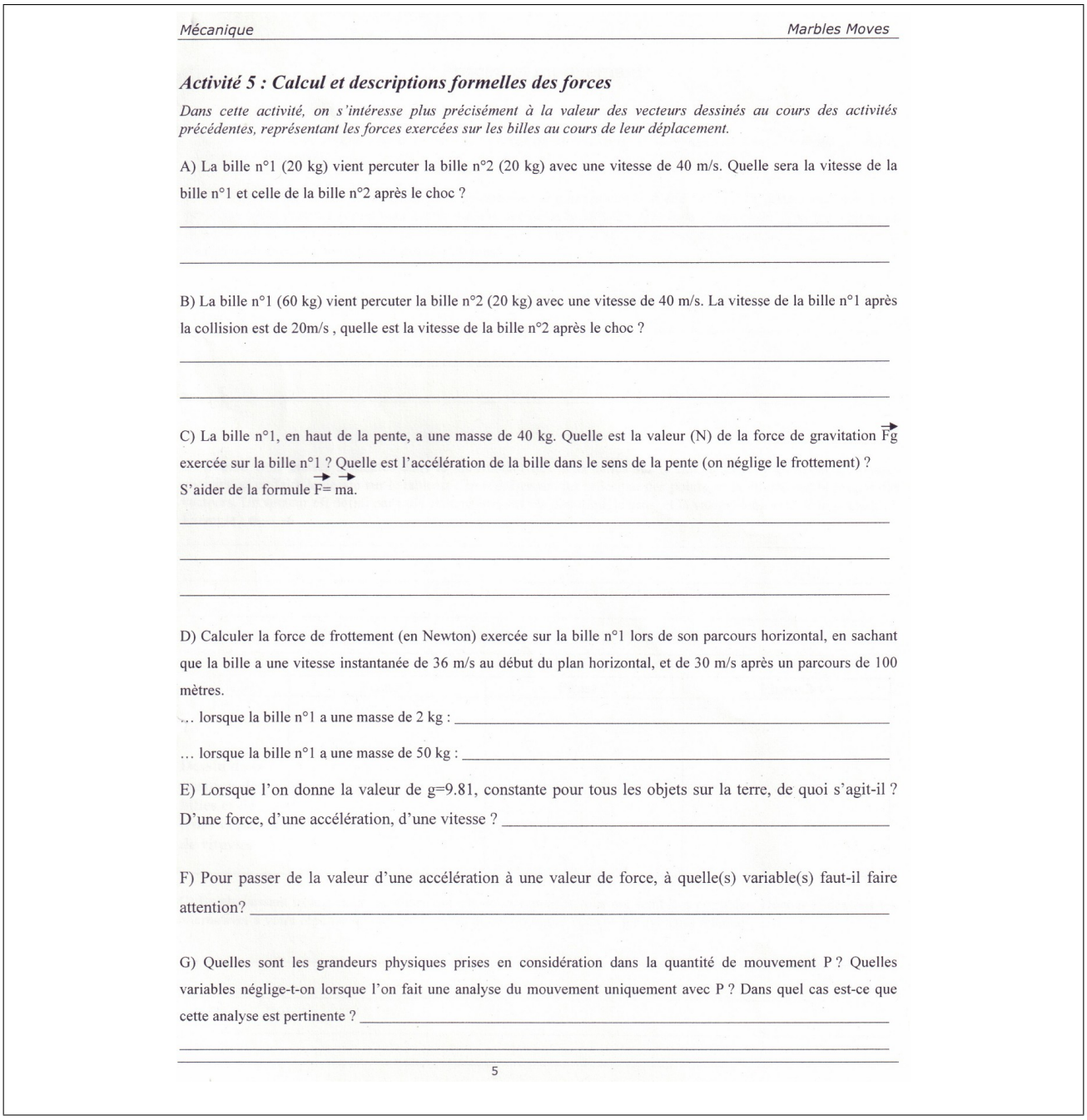
B) Faire la somme des vecteurs représentant les forces exercées sur la bille n°1, répertoriée dans l'activité 4A. Comparer la direction et le sens de ces vecteurs avec ceux représentant l'accélération. Que remarquez-vous ?

Tableau 4 *avec force de frottement*	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 3**
1B : **Dessin de la position des billes (rappel)**			
4A : **Vecteurs représentant les forces exercées sur la bille n°1, elle-même représentée par un point**			
4B : **Somme des vecteurs représentant les forces exercées sur la bille n°1**			

C) Que se passe-t-il à l'instant du choc ? Dessiner les forces exercées sur la bille n°1 et les forces exercées sur la bille n°2, au moment du choc.

Forces exercées sur la bille n°1 :	Forces exercées sur la bille n°2 :

FIGURE B.8 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 4.



Mécanique *Marbles Moves*

Activité 5 : Calcul et descriptions formelles des forces

Dans cette activité, on s'intéresse plus précisément à la valeur des vecteurs dessinés au cours des activités précédentes, représentant les forces exercées sur les billes au cours de leur déplacement.

A) La bille n°1 (20 kg) vient percuter la bille n°2 (20 kg) avec une vitesse de 40 m/s. Quelle sera la vitesse de la bille n°1 et celle de la bille n°2 après le choc ?

B) La bille n°1 (60 kg) vient percuter la bille n°2 (20 kg) avec une vitesse de 40 m/s. La vitesse de la bille n°1 après la collision est de 20m/s , quelle est la vitesse de la bille n°2 après le choc ?

C) La bille n°1, en haut de la pente, a une masse de 40 kg. Quelle est la valeur (N) de la force de gravitation $\vec{Fg}$ exercée sur la bille n°1 ? Quelle est l'accélération de la bille dans le sens de la pente (on néglige le frottement) ?
S'aider de la formule $\vec{F} = \vec{ma}$.

D) Calculer la force de frottement (en Newton) exercée sur la bille n°1 lors de son parcours horizontal, en sachant que la bille a une vitesse instantanée de 36 m/s au début du plan horizontal, et de 30 m/s après un parcours de 100 mètres.

... lorsque la bille n°1 a une masse de 2 kg : _____

... lorsque la bille n°1 a une masse de 50 kg : _____

E) Lorsque l'on donne la valeur de g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre, de quoi s'agit-il ? D'une force, d'une accélération, d'une vitesse ? _____

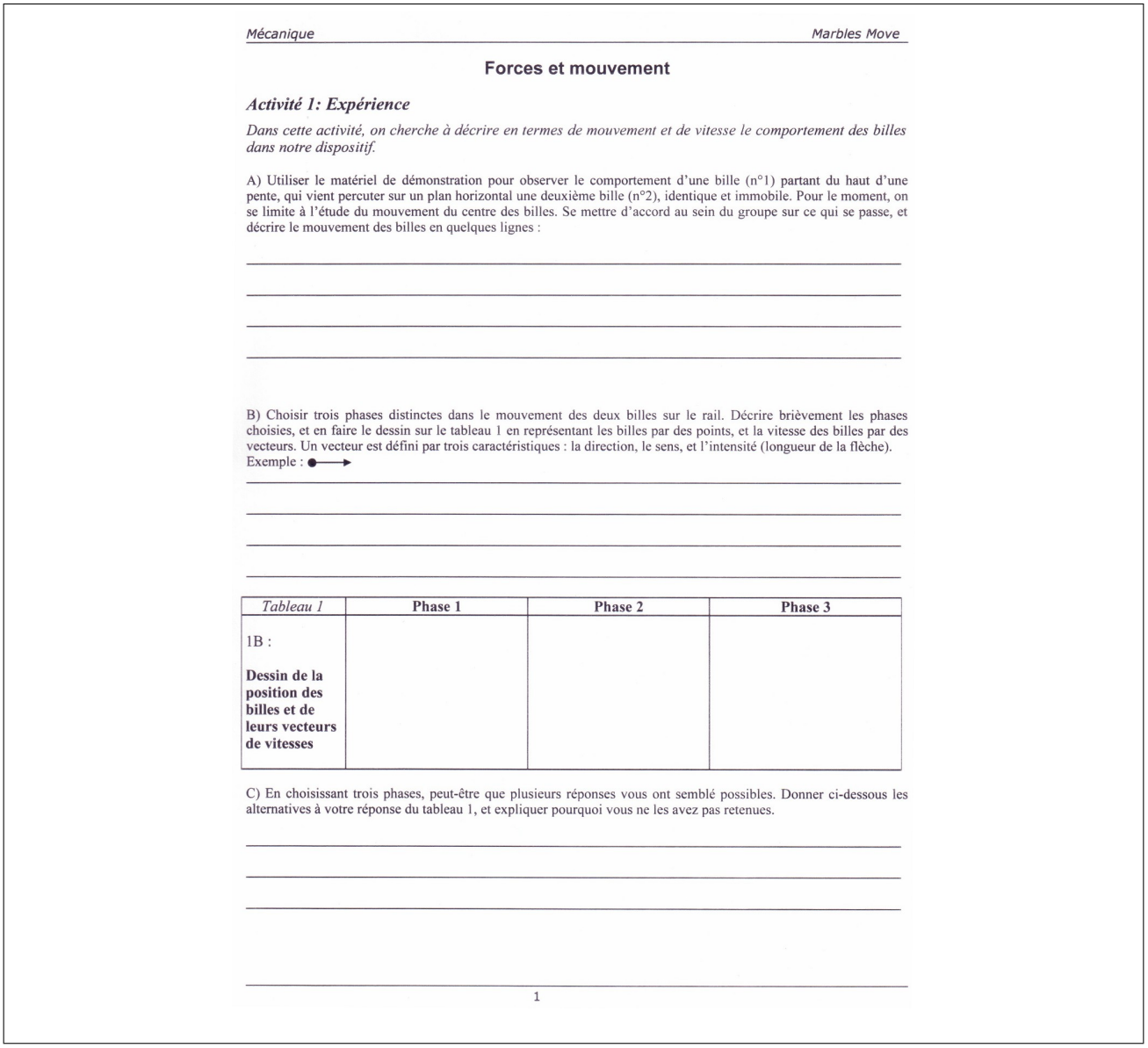
F) Pour passer de la valeur d'une accélération à une valeur de force, à quelle(s) variable(s) faut-il faire attention? _____

G) Quelles sont les grandeurs physiques prises en considération dans la quantité de mouvement P ? Quelles variables néglige-t-on lorsque l'on fait une analyse du mouvement uniquement avec P ? Dans quel cas est-ce que cette analyse est pertinente ? _____

5

FIGURE B.9 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe A, page 5.

B.1.3 Éléments du dispositif d'enseignement mi-fini (version B)



Mécanique *Marbles Move*

Forces et mouvement

Activité 1: Expérience

Dans cette activité, on cherche à décrire en termes de mouvement et de vitesse le comportement des billes dans notre dispositif.

A) Utiliser le matériel de démonstration pour observer le comportement d'une bille (n°1) partant du haut d'une pente, qui vient percuter sur un plan horizontal une deuxième bille (n°2), identique et immobile. Pour le moment, on se limite à l'étude du mouvement du centre des billes. Se mettre d'accord au sein du groupe sur ce qui se passe, et décrire le mouvement des billes en quelques lignes :

B) Choisir trois phases distinctes dans le mouvement des deux billes sur le rail. Décrire brièvement les phases choisies, et en faire le dessin sur le tableau 1 en représentant les billes par des points, et la vitesse des billes par des vecteurs. Un vecteur est défini par trois caractéristiques : la direction, le sens, et l'intensité (longueur de la flèche).
Exemple : ●⟶

Tableau 1	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 3**
1B : **Dessin de la position des billes et de leurs vecteurs de vitesses**			

C) En choisissant trois phases, peut-être que plusieurs réponses vous ont semblé possibles. Donner ci-dessous les alternatives à votre réponse du tableau 1, et expliquer pourquoi vous ne les avez pas retenues.

1

FIGURE B.10 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 1.

Activité 2: Analyser

Dans cette activité, on s'intéresse à l'influence des différentes variables sur la vitesse des billes.

A) Utiliser le matériel de démonstration et le logiciel Marbles Move pour déterminer quelle(s) variable(s) influence(nt) la vitesse de la bille n°1 avant le collision.

Reporter les résultats dans la **première** colonne du tableau 2.

Variables	**Description de l'influence sur la vitesse de la bille n°1 avant la collision**	**Description de l'influence sur la vitesse de la bille n°2 après la collision** (comparée à la vitesse de la bille n°1 avant la collision)
hauteur de la bille n°1 sur la pente (m)		
inclinaison de la pente à gauche (°)		
masse de la bille n°1 (kg)		
frottement du sol (N)		
Une 2ème bille à gauche de la bille n°1		

B) Utiliser le matériel de démonstration et le logiciel Marbles Move pour déterminer quelle(s) variable(s) influence(nt) la vitesse de la bille n°2 après la collision, comparée à la vitesse de la bille n°1 avant la collision.

Reporter les résultats dans la **deuxième** colonne du tableau 2.

C) En l'absence de frottement, quel est le rapport entre la vitesse de la bille n°1 avant le choc, et la vitesse de la bille n°2 après le choc : - quand la masse des deux billes est égale (M_1=M_2) ?

_____

- quand la masse de la bille n°1 est supérieure à la masse de la bille n°2 (M_1>M_2) ?

_____

- quand la masse de la bille n°1 est inférieure à la masse de la bille n°2 (M_1<M_2) ?

_____

D) Que faut-il en conclure ? Tenter d'écrire une formule générale ou une phrase exprimant le rapport entre la vitesse de la bille n°1 avant le choc et la vitesse de la bille n°2 après le choc. Quelles sont la(les) variable(s) pertinente(s) ?

_____

_____

_____

2

FIGURE B.11 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 2.

Activité 3 : Description en grandeurs physiques du mouvement

Dans cette activité, on s'intéresse aux forces exercées sur les billes au cours de leur déplacement.

A) Il s'agit à présent de décrire le mouvement de la bille n°1 en grandeurs physiques, au cours des trois phases. Dessiner dans le tableau 3 un point qui représente la bille n°1, et un vecteur qui représente la vitesse de la bille. Pour l'instant, on néglige le frottement.

B) Préciser ensuite si cette vitesse est constante ou non, et dessiner le vecteur représentant l'accélération de la bille. Pour l'instant, on néglige le frottement.

C) Reprendre les points 3A) et 3B) du tableau 3 en tenant compte de la force de frottement, et comparer les résultats. Quel est l'influence de la force de frottement sur l'accélération et sur la vitesse de la bille ? Dessiner, à la dernière ligne du tableau 3, le vecteur représentant la force de frottement F_f exercée sur la bille n°1.

Tableau 3 sans force de frottement	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 3**
1B : **Dessin de la position des billes (rappel)**			
3A : **Vecteur représentant la vitesse de la bille n°1, représentée par un point**			
3B : **Est-ce que la vitesse est constante ? Sinon, est-ce que la bille accélère ou décélère ?**	_____ _____	_____ _____	_____ _____
avec force de frottement 3C : **Vecteur représentant l'accélération de la bille n°1, représentée par un point**			
avec force de frottement 3C : **Vecteur représentant la force de frottement exercée par le sol sur la bille n°1**			

FIGURE B.12 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 3.

Activité 4 : Description de changement d'état à l'aide des forces

Dans cette activité, on s'intéresse aux forces exercées sur les billes au cours de leur déplacement.

A) Dans l'activité 3, la force de frottement permet d'expliquer la décélération de la bille n°1 au cours de son déplacement horizontal. Lorsque l'on ne tient pas compte du frottement, la vitesse de la bille n°1 est constante. En s'inspirant du rôle de la force de frottement dans ce mouvement horizontal, essayer de répondre à la question suivante :

Quelles forces faut-il ajouter à notre description du mouvement pour expliquer l'accélération de la bille n°1 au cours des 3 phases ?

Représenter les forces exercées sur la bille n°1 par des vecteurs dans le tableau 4.

B) Faire la somme des vecteurs représentant les forces exercées sur la bille n°1, répertoriée dans l'activité 4A. Comparer la direction et le sens de ces vecteurs avec ceux représentant l'accélération. Que remarquez-vous ?

Tableau 4 avec force de frottement	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 3**
1B : **Dessin de la position des billes (rappel)**			
4A : **Vecteurs représentant les forces exercées sur la bille n°1, elle-même représentée par un point**			
4B : **Somme des vecteurs représentant les forces exercées sur la bille n°1**			

C) Que se passe-t-il à l'instant du choc ? Dessiner les forces exercées sur la bille n°1 et les forces exercées sur la bille n°2 à l'instant du choc, et spécifier par quoi ces forces s'appliquent sur les billes.

Forces exercées sur la bille n°1 :	Forces exercées sur la bille n°2 :

FIGURE B.13 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 4.

Activité 5 : Calculs et descriptions formelles des forces Activité individuelle !

Dans cette activité, on s'intéresse plus précisément à l'intensité des vecteurs dessinés au cours des activités précédentes, représentant les forces exercées sur les billes au cours de leur déplacement.

A) La bille n°1 (20 kg) vient percuter la bille n°2 (20 kg) sur un plan horizontal avec une vitesse de 40 m/s. Quelle sera la vitesse de la bille n°1 et celle de la bille n°2 après le choc (on néglige le frottement) ?

B) La bille n°1 (60 kg) vient percuter la bille n°2 (20 kg) sur un plan horizontal avec une vitesse de 40 m/s. La vitesse de la bille n°1 après la collision est de 20m/s, quelle est la vitesse de la bille n°2 après le choc (on néglige le frottement)?

C) La bille n°1, en haut de la pente (30°), a une masse de 40 kg. Quelle est la valeur (N) de la force de gravitation $\vec{Fg}$ exercée sur la bille n°1 ? Quelle est l'accélération de la bille dans le sens de la pente si on néglige le frottement ? S'aider de la formule $\vec{F} = \vec{ma}$.

D) Calculer la force de frottement (en Newton) exercée sur la bille n°1 lors de son parcours horizontal, en sachant que la bille a une vitesse instantanée de 36 m/s au début du plan horizontal, et de 30 m/s après un parcours de 100m.

… lorsque la bille n°1 a une masse de 2 kg :

… lorsque la bille n°1 a une masse de 50 kg :

E) Lorsque l'on donne la valeur de g=9.81, constante pour tous les objets sur la terre, de quoi s'agit-il ? D'une force, d'une accélération, d'une vitesse ?

F) Pour passer d'une valeur d'accélération à une valeur de force, quelle(s) variable(s) faut-il considérer?

G) Quelles sont les grandeurs physiques prises en considération dans la quantité de mouvement P ?

Quelles variables néglige-t-on lorsque l'on fait une analyse du mouvement uniquement avec P ?

Dans quel(s) cas cette analyse est-elle pertinente ?

FIGURE B.14 – Série d'exercices utilisée avec la demi-classe B, page 5.

B.2 Éléments de la séquence d'enseignement planifiée

B.2.1 Questionnaire pré-séquence élaboré par l'enseignant

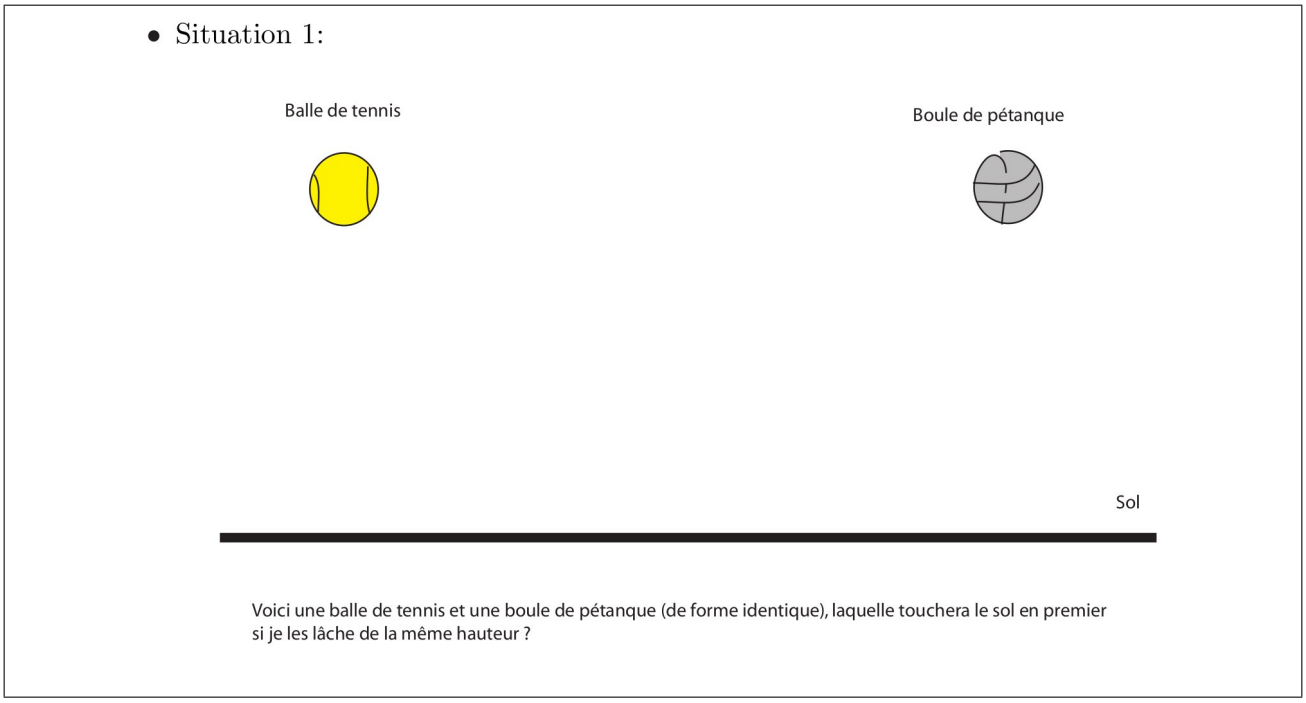
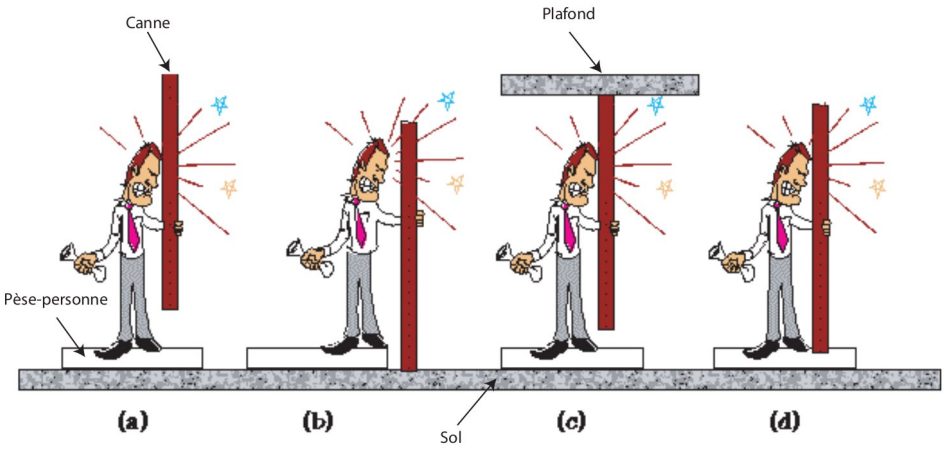


FIGURE B.15 – Questionnaire pré-séquence : item 1.

- Situation 2:



La pesronne est :

a) debout sur le pèse-personne avec la canne à la main,
b) debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le sol,
c) debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le plafond,
d) debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le pèse-personne.

L'indication sur le pèse-personne est supérieure, égale ou inférieure à celle de la première situation c.à.d la situation a)?

FIGURE B.16 – Questionnaire pré-séquence : item 2.

- Situation 3:



Dans les trois situations qui se succèdent, représentez les forces qui s'exercent sur le ballon?

FIGURE B.17 – Questionnaire pré-séquence : item 3.

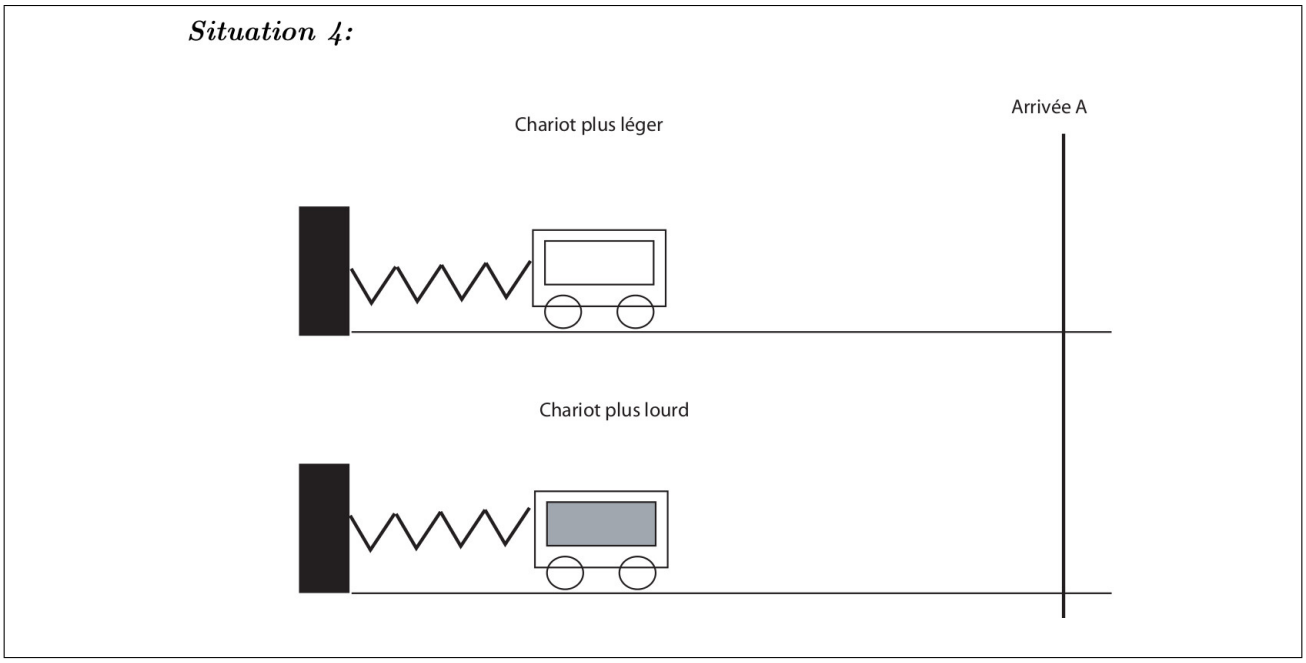


FIGURE B.18 – Questionnaire pré-séquence : item 4.

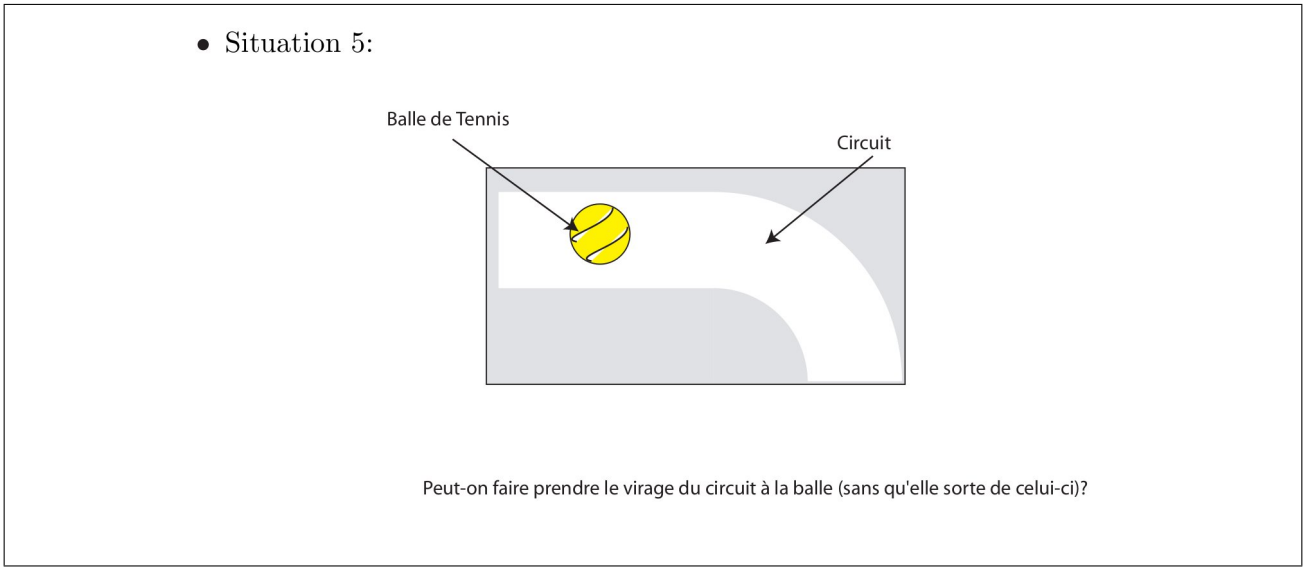
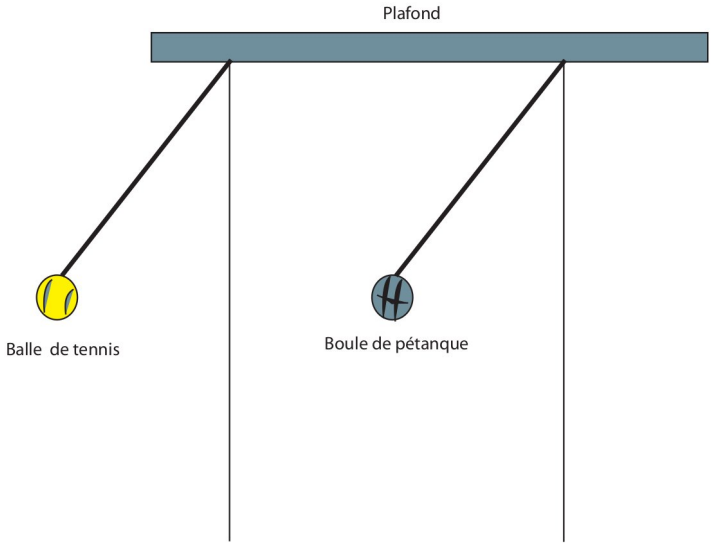


FIGURE B.19 – Questionnaire pré-séquence : item 5.

- Situation 6:



On lâche, au même temps et au même condition, deux masses différentes (voir la figure!)

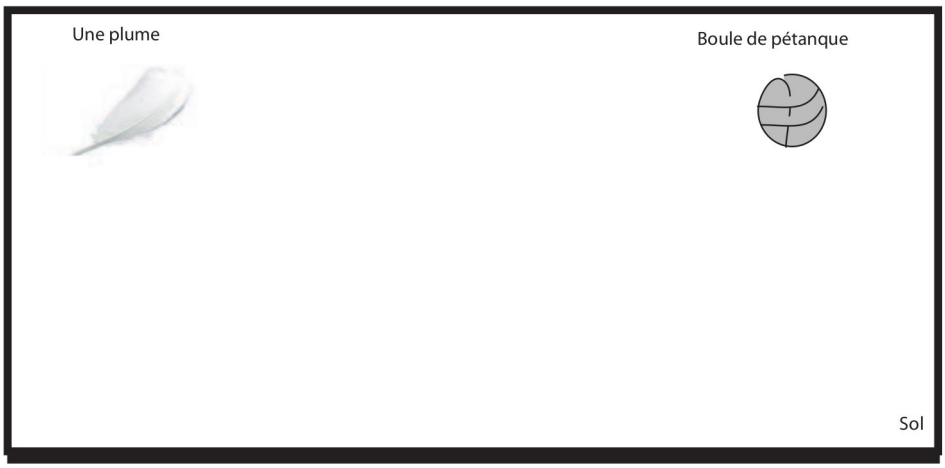
Lequel des deux masses fait un mouvement d'aller-retour en minimum de temps?

FIGURE B.20 – Questionnaire pré-séquence : item 6.

B.2.2 Questionnaire post-séquence élaboré par l'enseignant

NB: Répondez à la question dans chaque situation en justifiant votre réponse.

– **Situation 1**:

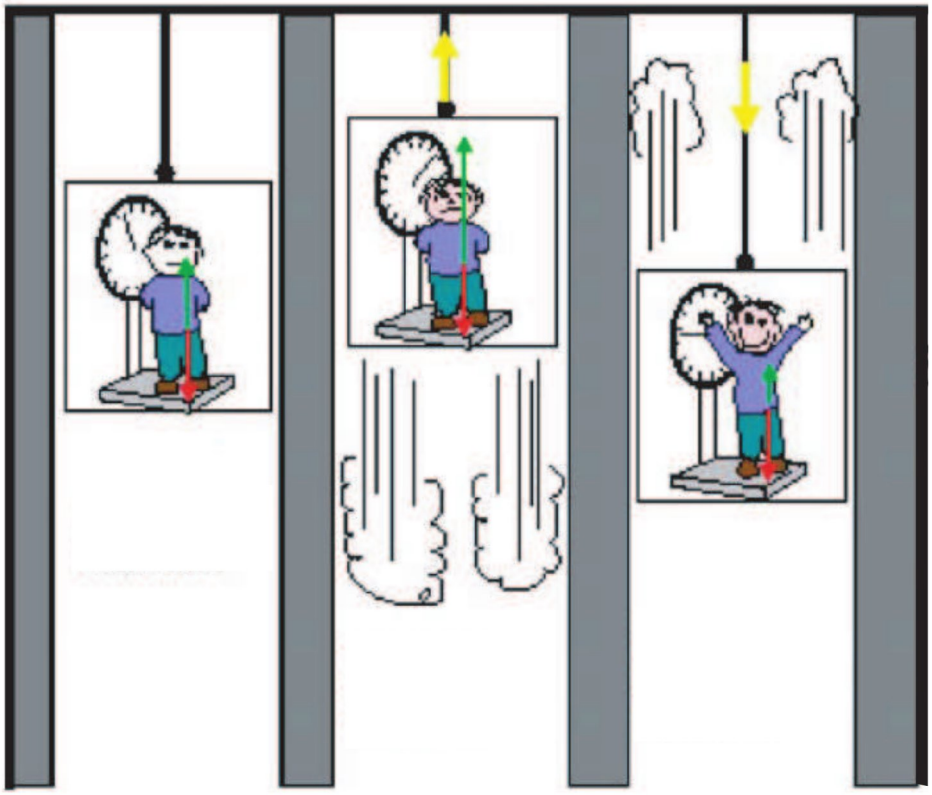


Voici une plume et une boule de pétanque dans le vide, laquelle touchera le sol en premier si je les lâche de la même hauteur?

FIGURE B.21 – Questionnaire post-séquence : item 7.

– **Situation 2**:

A) l'ascenseur est arrêté. B) l'ascenseur monte. C) l'ascenseur descend.



L'indication sur le pèse-personne est supérieure, égale ou inférieure à celle de la première situation c.à.d la situation A)?

FIGURE B.22 – Questionnaire post-séquence : item 8.

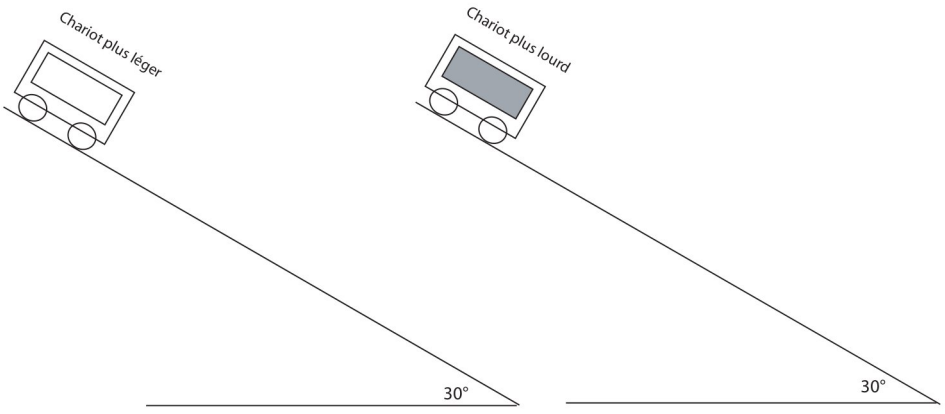
– **Situation 3**:



Représentez les forces qui s'exercent sur le bouchon dans les différentes positions?

FIGURE B.23 – Questionnaire post-séquence : item 9.

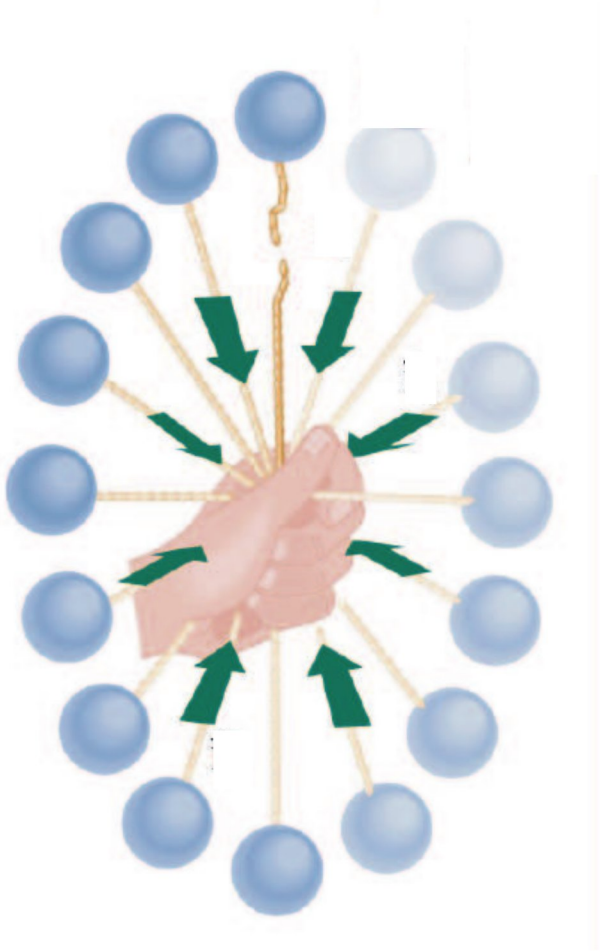
– **Situation 4**:



Deux chariots de masses différentes, mobiles sur un plan incliné, sont lancés au même temps, lequel des deux chariot arrive-t-il le premier en bas de la pente?

FIGURE B.24 – Questionnaire post-séquence : item 10.

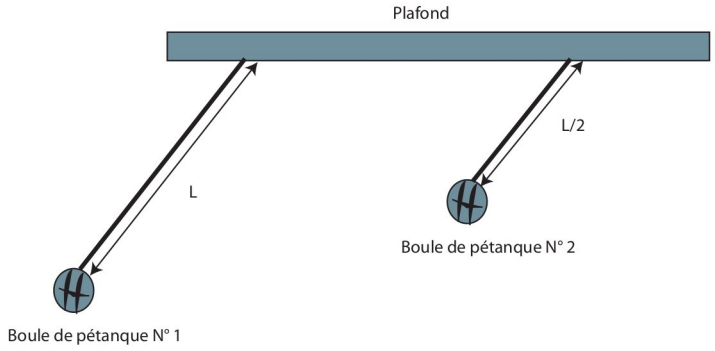
– **Situation 5**:



En faisant tourner une balle attachée à un fil, on aperçoit que celle-ci se détache du fil, indiquez sur le schéma ci-dessus sa trajectoire.

FIGURE B.25 – Questionnaire post-séquence : item 11.

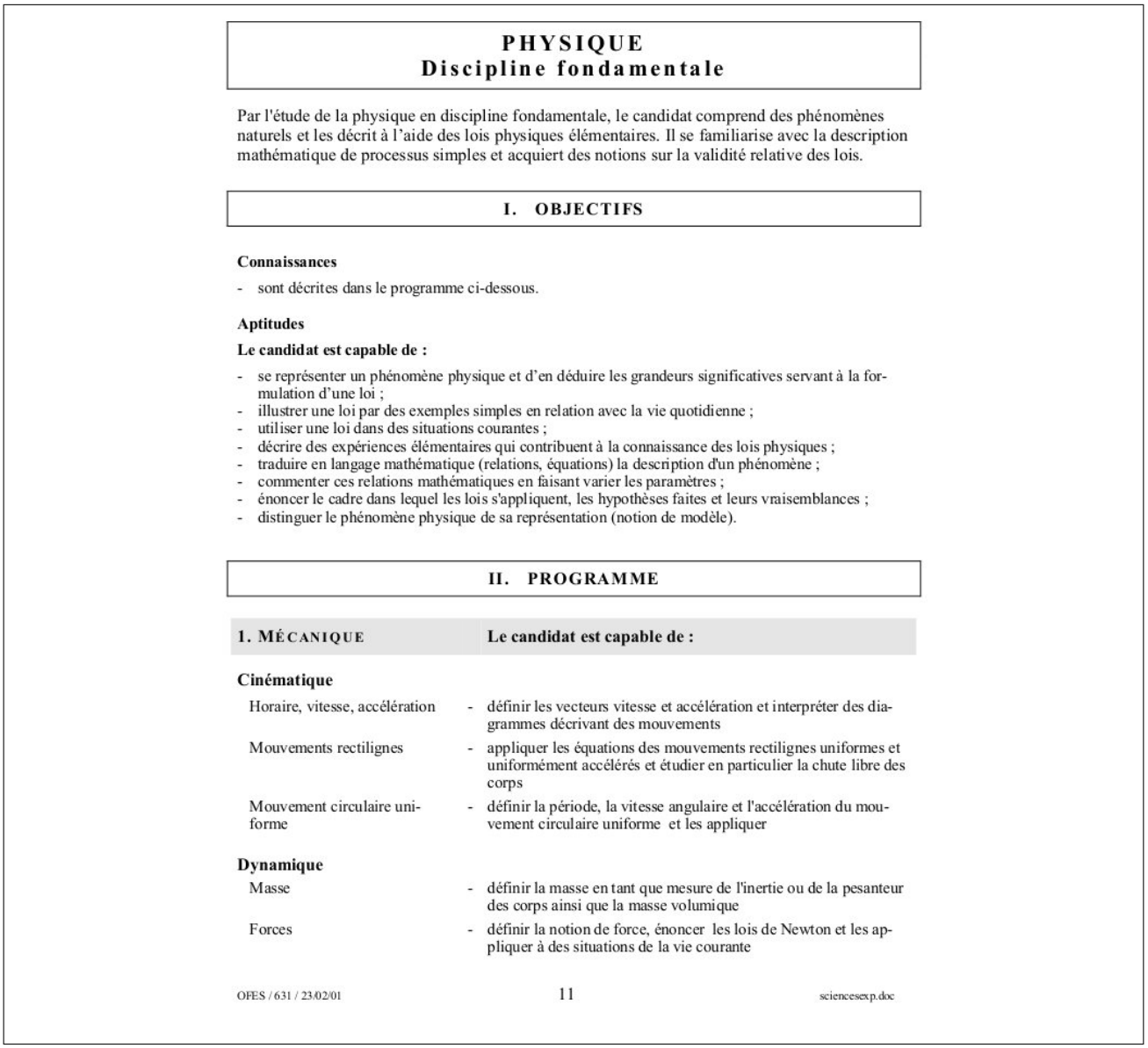
– **Situation 6:**



On lâche, en même temps, deux boules de pétanque de même masse.(voir la figure!) Lequel des deux boules fait un mouvement d'aller-retour en minimum de temps?

FIGURE B.26 – Questionnaire post-séquence : item 12.

B.3 Objectifs et programme scolaire en physique



PHYSIQUE
Discipline fondamentale

Par l'étude de la physique en discipline fondamentale, le candidat comprend des phénomènes naturels et les décrit à l'aide des lois physiques élémentaires. Il se familiarise avec la description mathématique de processus simples et acquiert des notions sur la validité relative des lois.

I. OBJECTIFS

Connaissances

- sont décrites dans le programme ci-dessous.

Aptitudes

Le candidat est capable de :

- se représenter un phénomène physique et d'en déduire les grandeurs significatives servant à la formulation d'une loi ;
- illustrer une loi par des exemples simples en relation avec la vie quotidienne ;
- utiliser une loi dans des situations courantes ;
- décrire des expériences élémentaires qui contribuent à la connaissance des lois physiques ;
- traduire en langage mathématique (relations, équations) la description d'un phénomène ;
- commenter ces relations mathématiques en faisant varier les paramètres ;
- énoncer le cadre dans lequel les lois s'appliquent, les hypothèses faites et leurs vraisemblances ;
- distinguer le phénomène physique de sa représentation (notion de modèle).

II. PROGRAMME

1. MÉCANIQUE	Le candidat est capable de :
Cinématique	
Horaire, vitesse, accélération	- définir les vecteurs vitesse et accélération et interpréter des diagrammes décrivant des mouvements
Mouvements rectilignes	- appliquer les équations des mouvements rectilignes uniformes et uniformément accélérés et étudier en particulier la chute libre des corps
Mouvement circulaire uniforme	- définir la période, la vitesse angulaire et l'accélération du mouvement circulaire uniforme et les appliquer
Dynamique	
Masse	- définir la masse en tant que mesure de l'inertie ou de la pesanteur des corps ainsi que la masse volumique
Forces	- définir la notion de force, énoncer les lois de Newton et les appliquer à des situations de la vie courante

OFES / 631 / 23.02/01 11 sciencesexp.doc

FIGURE B.27 – Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 1.

Examen suisse de maturité *Directives 2003-2006*		*DS 11* *Physique DF*
	- représenter et calculer des forces de pesanteur, de frottements, de propulsion - décrire les forces et accélération dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme	
Travail	- définir le travail en particulier dans les cas suivants : poids, force propulsive, frottements	
Energie	- définir les énergies cinétique et potentielle - présenter le principe général de la conservation de l'énergie et l'illustrer à l'aide d'exemples simples	
Puissance, rendement	- définir la puissance moyenne et le rendement	
Statique des fluides		
Pression	- définir la pression et calculer sa variation dans un fluide de masse volumique constante - énoncer le principe de Pascal, l'appliquer à la presse hydraulique	
Poussée d'Archimède	- expliquer la poussée d'Archimède et analyser les forces qui s'exercent sur un corps flottant	
Gravitation		
Mouvement des planètes et des satellites	- énoncer la loi de la gravitation de Newton et l'appliquer aux satellites en orbite circulaire.	
2. CHALEUR	**Le candidat est capable de :**	
Température		
Température	- présenter la notion de température - définir et utiliser les échelles Celsius et Kelvin	
Dilatation	- calculer la dilatation thermique des solides et des liquides; expliquer le fonctionnement d'un thermomètre basé sur une dilatation	
Gaz parfait	- décrire le modèle du gaz parfait et donner une interprétation qualitative de la température et de la pression par le mouvement des molécules - définir la mole et expliquer la loi d'Avogadro - appliquer la loi des gaz parfaits	
Chaleur	- définir les notions de chaleur et d'énergie interne - définir la capacité thermique - énoncer et illustrer le premier principe de la thermodynamique - décrire les modes de transfert de la chaleur	
Changements d'état	- décrire les états de la matière et les conditions de changements d'état - définir la chaleur latente de fusion et de vaporisation - étudier l'état d'équilibre d'un mélange donné (avec changements d'état).	

FIGURE B.28 – Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 2.

Examen suisse de maturité *Directives 2003-2006*	*DS 11* *Physique DF*

3. ELECTRICITÉ	**Le candidat est capable de :**
Electrostatique	
Charges électriques	- définir la charge électrique
Forces électriques	- appliquer la loi de Coulomb
Tension électrique	- définir la tension électrique
Circuit électrique	
Intensité du courant	- définir l'intensité du courant
Résistance électrique	- utiliser la loi d'Ohm dans un circuit simple et à plusieurs branches
Effets du courant	- décrire les effets calorifique (effet Joule) et magnétique du courant et déterminer la puissance transformée dans une portion de circuit
Electricité dans les habitations	- différencier les courants continu et alternatif ; connaître les dangers du courant électrique et décrire les mesures de sécurité à prendre
Magnétisme	
Champ magnétique	- décrire le champ magnétique produit par un courant rectiligne et l'appliquer à l'électroaimant
Effets du champ magnétique	- décrire de manière qualitative les effets du champ magnétique sur un courant.

4. LA LUMIÈRE	**Le candidat est capable de :**
Phénomènes fondamentaux	- décrire la propagation rectiligne de la lumière, la réflexion, la réfraction et la dispersion; utiliser les lois qui en découlent pour expliquer le fonctionnement du miroir plan et des lentilles
Dualité : onde-corpuscule	- reconnaître le caractère corpusculaire et ondulatoire de la lumière (photons et ondes lumineuses).

5. PHYSIQUE NUCLÉAIRE	**Le candidat est capable de :**
Le noyau	- décrire les constituants du noyau et les forces nucléaires, électriques, qui s'exercent entre eux
Masse-énergie	- décrire la relation entre défaut de masse et énergie de liaison
Eléments radioactifs	- distinguer qualitativement les radioactivités α, β et γ - représenter la décroissance radioactive et la période de demi-vie d'un élément - expliquer sommairement la pénétration et les effets biologiques des rayonnements radioactifs
Réactions nucléaires	- décrire les réactions de fission et de fusion.

FIGURE B.29 – Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 3.

Examen suisse de maturité *Directives 2003-2006*	*DS 15* *Interrelations*

INTERRELATIONS

Les sciences expérimentales fournissent une "grille de lecture" du monde matériel qui trouve toute sa richesse dans la complémentarité de chaque discipline. L'approche interdisciplinaire est l'occasion d'acquérir et de développer cette grille de lecture à entrées multiples.

Le but de l'examen dans la partie interdisciplinaire (interrelations) est d'évaluer essentiellement l'acquisition de cette compétence de lecture. Aussi n'y a-t-il pas de programme à proprement parler mais une liste de thèmes pouvant donner lieu à des questions et cités comme exemples.

I. OBJECTIFS

Le candidat peut utiliser ses connaissances en biologie, chimie et physique afin de :

- décrire un phénomène de la manière à la fois la plus précise et la plus globale possible et de formuler des hypothèses explicatives plausibles ;
- raisonner sur des problèmes en partant d'une approche globale (reconnaissance des apports de chacune des sciences expérimentales) ;
- extraire d'une publication, d'un article, les éléments issus des trois disciplines, de les classer, les hiérarchiser et donner leurs "rôles respectifs" ;
- faire une synthèse à partir de divers éléments.

II. EXEMPLES DE THÈMES

Organes des sens - anatomie, physiologie, correction des défauts, couleur - onde, réfraction, lentilles, image, couleur, spectre.	Analyse de nos comportements de citoyens consommateurs à l'aide de connaissances en sciences expérimentales (choix de modes de transports, de chauffages…).
Les molécules du vivant - glucides, protides, lipides - formule, liaison, polymérisation, estérification - propriétés physiques de ces substances.	Du Soleil à la croissance d'un arbre - photosynthèse, transport actif et passif - réaction, polymérisation, cellulose - onde, énergie, gravité, forces.
Analyse de l'adaptation des êtres vivants aux conditions physico-chimiques des milieux dans lesquels ils vivent.	Apports des sciences expérimentales à la compréhension de problèmes en relation avec l'énergie : du Soleil au vivant; de l'atome à un appareil électrique; choix d'un mode de transport ou de chauffage.
Comparaison de l'énergie utilisée par un organisme vivant avec celle nécessaire au fonctionnement d'une machine thermique.	Système circulatoire et pression artérielle - anatomie du système cardio-vasculaire - pression, frottements.
Apports du modèle atomique et de la physique phénoménologique à la compréhension du monde.	

FIGURE B.30 – Exigences pour la passation de l'examen de maturité (BAC), Suisse romande, 2006, page 4.

B.4 Polycopiés de cours utilisés par la classe étudiée

B.4.1 Cours intitulé “cinématique”

L'extrait présenté ci-dessous constitue le dernier paragraphe du cours de cinématique, et est particulièrement important pour la séquence étudiée :

La chute libre d'un corps dans le vide.

Les objets lancés retombent sur le sol de la Terre avec une accélération constante, dirigée vers le bas ; $\boxed{g = 9{,}81\,\frac{m}{s^2}}$. La valeur de cette accélération dépend à la fois de la pesanteur et de la rotation de la Terre. Cette valeur est, pour l'équateur $g = 9{,}78\,\frac{m}{s^2}$ et pour le pôle nord $g = 9{,}83\,\frac{m}{s^2}$. Les variations sont donc faibles. En revanche, si on considère la chute des corps sur une autre planète ou astre, cette valeur peut être franchement différente ($g_{Lune} = 1{,}6\,\frac{m}{s^2}$).

Pour poser les équations de la chute libre, on considère un axe y vertical, dirigé vers le haut. L'accélération est ainsi comptée négativement car elle est dirigée vers le bas. L'origine de l'axe est fixée lorsque l'objet est à la position de départ (t_0).

Equations :

$$\boxed{v = v_0 - gt}$$

$$\boxed{y = v_0 t - \tfrac{1}{2} g t^2}$$

$$\boxed{v^2 = v_0^2 - 2gy}$$

Si on lance une balle vers le haut, il peut être intéressant de découvrir l'altitude maximale atteinte par le projectile. La condition à satisfaire est de trouver une vitesse ascensionnelle nulle à cet endroit.

$$\boxed{y_{max} = \frac{v_0^2}{2g}}$$

FIGURE B.31 – Extrait du cours “cinématique” : la chute libre d'un corps dans le vide.

Aux pages suivantes, se trouve l'ensemble du polycopié du cours de cinématique.

Cinématique

La vitesse

Définition :

$$\text{vitesse scalaire moyenne} = \frac{\text{distance parcourue}}{\text{temps de parcours}}$$

ou bien, la vitesse moyenne peut-être exprimée à l'aide des symboles :

$$v_m = \frac{l}{t}$$

Transformation d'unités de vitesse :

m/s	km/h	mille marin/h (nœuds)
1,00	3,60	1,94
0,278	1,00	0,540
0,515	1,85	1,00

Vitesse instantanée.

La notation delta, variation d'une quantité.

Pour indiquer le changement d'une valeur ; le totalisateur d'une voiture indique 16 354 km au début d'un trajet, puis 16 421 km à la fin. La distance parcourue est la variation de la position du véhicule :

$$\Delta l = l_{final} - l_{initial} = 16\,421\ km - 16\,354\ km = 67\ km$$

Si l'heure de départ de la voiture était midi et qu'elle est arrivée à destination à 13h24, on définit la durée du trajet :

$$\Delta t = t_{final} - t_{initial} = 13h24 - 12h00 = 1{,}40h$$

et sa vitesse moyenne est alors donnée par la relation :

$$v_m = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{67\ km}{1{,}40\ h} = 47{,}9\ km/h$$

La vitesse instantanée.

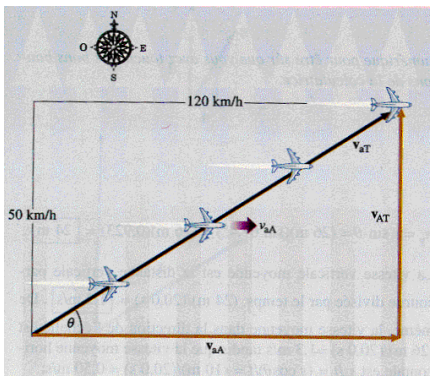
C'est la vitesse indiquée par le compteur de vitesse. Elle est valable à l'instant où on lit l'instrument. On peut la mesurer, dans une expérience, en chronométrant un chariot se déplaçant sur une distance très courte. Elle est définie comme une limite (en fait, on utilise la notion de dérivée, que vous aborderez en mathématiques plus tard) :

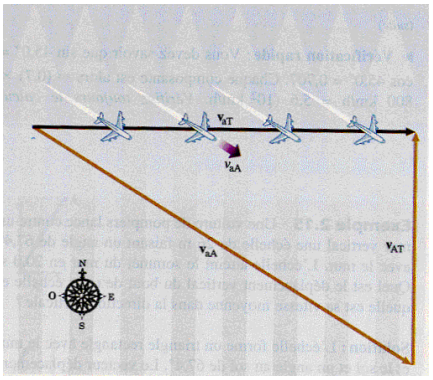
$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

La vitesse est une grandeur vectorielle. En effet, il faut toujours tenir compte de sa direction pour connaître exactement le déplacement.

Mouvement relatif.

On ne peut jamais avoir la certitude qu'un objet est en mouvement ou non (calculer la vitesse d'un point de la Terre en rotation sur elle-même, sa vitesse orbitale autour du Soleil).





Un avion vole vers l'est dans un vent dirigé vers le nord. L'avion est entraîné dans une direction θ du nord-est. Le pilote doit se diriger vers le sud-est afin de compenser la vitesse du vent.

L'accélération

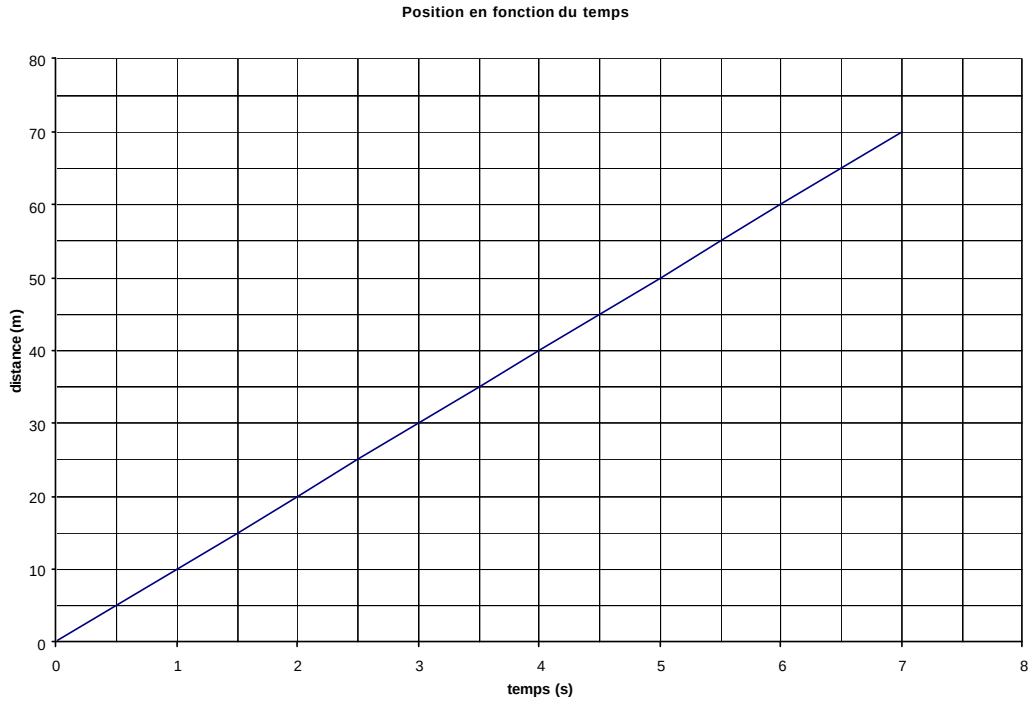
C'est le taux de variation de la vitesse.

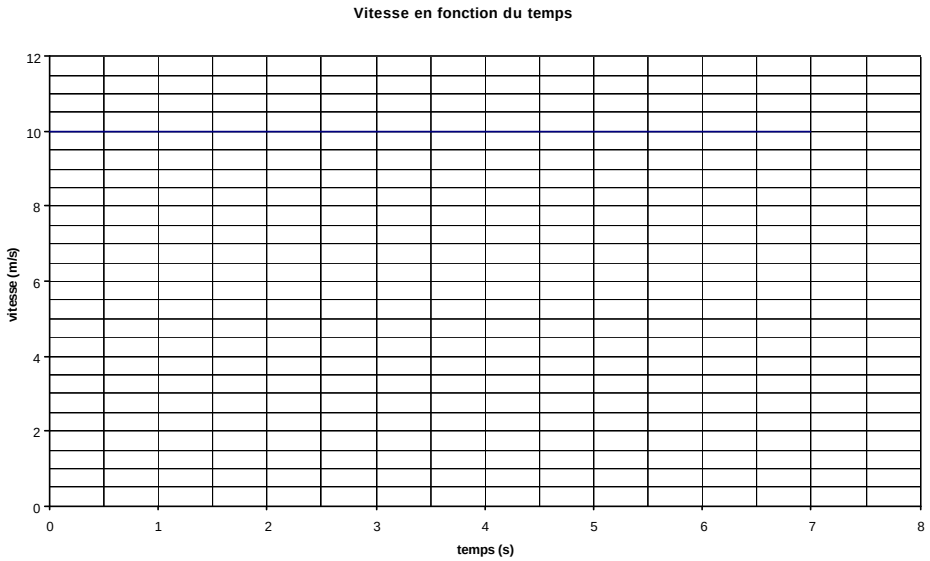
$$\text{accélérati on moyenne} = \frac{\text{variation de vitesse}}{\text{temps écoulé}}$$

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$$

Le mouvement rectiligne uniforme.

On parle d'un tel mouvement lorsque la vitesse de l'objet est constante. On parle de x_0 pour décrire la position de l'objet au temps t=0 s, également v_0 est sa vitesse en t=0 s.





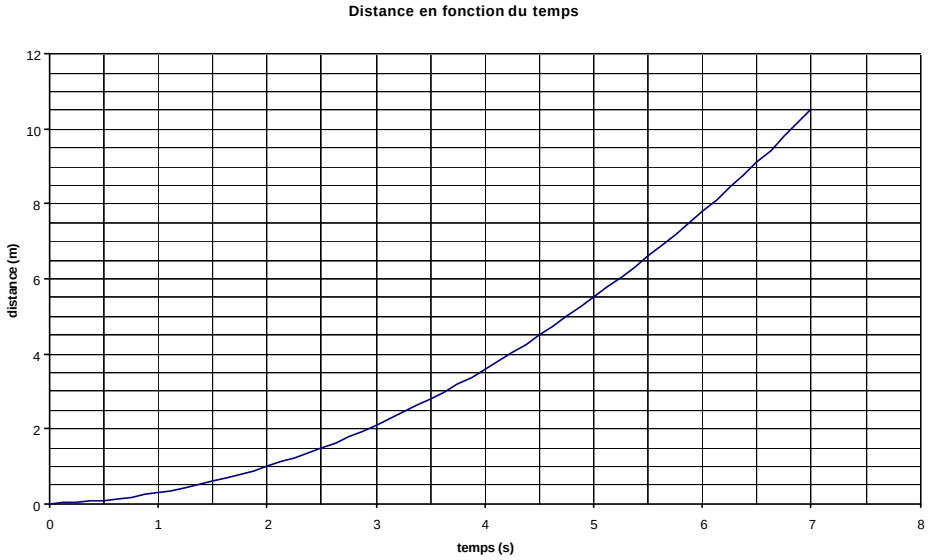
Sur ce graphique, l'aire sous la courbe entre deux instants quelconques est la hauteur (la vitesse) multiplié par la longueur (donc la durée) c'est à dire la distance parcourue.

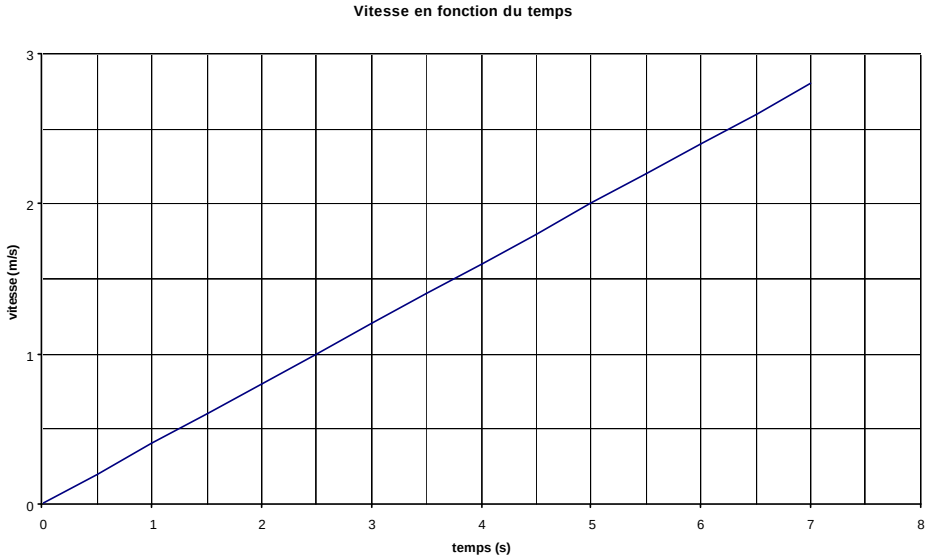
Equation :

$x = x_0 + vt$

Le mouvement rectiligne uniformément accéléré.

L'accélération est constante. Ce mouvement est très courant, à condition que l'on puisse négliger les frottements de l'air. C'est le mouvement d'un chariot qui est tiré par un contre-poids. C'est aussi le mouvement d'un objet en chute libre.





Comme pour le mouvement uniforme, la distance parcourue est la surface sous la courbe de ce graphique. Cette surface est celle d'un triangle, la hauteur (vitesse au temps t) multiplié par la base (le temps) divisé par deux.
Comme l'accélération est le taux de variation de vitesse et qu'elle est constante, elle représente la pente de la droite du graphique de la vitesse.
Equations :

$x = \frac{1}{2}(v + v_0)t$

$a = \frac{v - v_0}{t}$ $\rightarrow$ $\boxed{v = v_0 + at}$

des équations précédentes, on tire : $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ou bien $\boxed{x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2}$

et on peut montrer que $\boxed{v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)}$

La chute libre d'un corps dans le vide.

Les objets lancés retombent sur le sol de la Terre avec une accélération constante, dirigée vers le bas ; $\boxed{g = 9{,}81 \frac{m}{s^2}}$. La valeur de cette accélération dépend à la fois de la pesanteur et de la rotation de la Terre. Cette valeur est, pour l'équateur $g = 9{,}78 \frac{m}{s^2}$ et pour le pôle nord $g = 9{,}83 \frac{m}{s^2}$. Les variations sont donc faibles. En revanche, si on considère la chute des corps sur une autre planète ou astre, cette valeur peut être franchement différente ($g_{Lune} = 1{,}6 \frac{m}{s^2}$).

Pour poser les équations de la chute libre, on considère un axe *y* vertical, dirigé vers le haut. L'accélération est ainsi comptée négativement car elle est dirigée vers le bas. L'origine de l'axe est fixée lorsque l'objet est à la position de départ (t_0).

Equations :

$\boxed{v = v_0 - gt}$

$\boxed{y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2}$

$\boxed{v^2 = v_0^2 - 2gy}$

Si on lance une balle vers le haut, il peut être intéressant de découvrir l'altitude maximale atteinte par le projectile. La condition à satisfaire est de trouver une vitesse ascensionnelle nulle à cet endroit.

$\boxed{y_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}}$

Exercices.

1. La Lune décrit autour de la Terre une orbite circulaire de $3{,}84 \cdot 10^8$ *m* de rayon, en 27,3 jours. Calculer sa vitesse orbitale moyenne en m/s.
2. Loïc Perron a parcouru 492 milles nautiques en 24 heures. Calculer sa vitesse moyenne en nœud, en km/h et en m/s.
3. Un rallye automobile de 600 km a été emporté par une équipe de deux conducteurs, chacun d'eux a tenu le volant pendant la moitié du trajet. Sachant que la vitesse moyenne de l'un était de 60 km/h et de l'autre de 20 km/h, calculer leur vitesse moyenne globale.
4. Deux chevaliers vont à l'encontre l'un de l'autre. Le premier chevauche vers le sud à la vitesse de 5 km/h. L'autre fonce vers le nord à 25 km/h. A quelle vitesse les deux chevaliers s'approchent t-il l'un de l'autre ?
5. Une Jaguar peut atteindre, départ arrêté, la vitesse de 48,3 km/h en 3,80 s. Calculer son accélération moyenne.
6. Une balle sort à la vitesse de 900 m/s du canon de 60 cm d'une carabine Winchester. Déterminer: (a) son accélération; (b) la durée du trajet dans le canon.

7. Une particule située 5 m à l'est de l'origine se déplace vers l'ouest à 2 m/s. Cinq secondes plus tard, elle se trouve à 11 m à l'est de l'origine. Quelle était son accélération ?
8. Si un objet peut accélérer de façon continue à 10 m/s^2, quelle distance va-t-il parcourir et quel temps lui faudra-t-il pour atteindre: (a) la vitesse du son, 330 m/s; (b) la vitesse de libération d'une fusée de l'attraction terrestre, 11,2 km/s; (c) $3 \cdot 10^7\ m/s$ c'est-à-dire 10% de la vitesse de la lumière? (On suppose qu'il part du repos.)
9. Un train a une longueur de 44 m. L'avant du train se trouve à 100 m d'un poteau. Il accélère à raison de $0{,}5\ m/s^2$ à partir du repos. (a) Combien de temps lui faut-il pour passer devant le poteau ? (b) À quelles vitesses l'avant et l'arrière du train passent-ils devant le poteau ?
10. Une automobile roulant à 60 km/h arrive au niveau d'un train de 1 km de longueur qui roule à 40 km/h sur une voie parallèle à la route. Quelle distance parcourt l'automobile pendant qu'elle reste parallèle au train sur toute sa longueur, sachant qu'ils roulent (a) dans la même direction ou (b) dans de- directions opposées ?
11. Le chauffeur d'un camion roulant à 30 m/s aperçoit soudain un caribou à 70 m devant lui. Si le temps de réflexe du chauffeur est de 0,5 s et la décélération maximale de $8\ m/s^2$ peut-il éviter de heurter le caribou sans donner un coup de volant ?
12. De l'eau jaillit verticalement d'un tuyau placé au niveau du sol et atteint une hauteur de 3,2 m. (a) À quelle vitesse sort-elle du tuyau ? (b) Pendant combien de temps une goutte d'eau reste-t-elle en l'air ?
13. Une pierre lancée verticalement vers le haut à partir du sol monte jusqu'à une hauteur de 25 m. Quelle hauteur atteindrait-elle sur la Lune si elle était lancée avec la même vitesse initiale ? L'accélération due à la pesanteur sur la Lune vaut $1/6$ de celle sur la Terre.
14. Une pierre qu'on laisse tomber de la margelle d'un puits touche la surface de l'eau 1,5 s plus tard. (a) Quelle est la profondeur du puits? (b) À quelle vitesse la pierre touche t-elle l'eau ?
15. Un jouet en forme de fusée S'élève avec une vitesse constante de 20 m/s. Quand il se trouve à 24 m au-dessus du sol, un boulon se détache. (a) Combien de temps met le boulon pour arriver au sol ? (b) Quelle est sa hauteur maximale? (c) À quelle vitesse touche-t-il le sol?
16. Une balle de tennis tombe d'une hauteur de 5 m et rebondit jusqu'à une hauteur de 3,2 m. Si elle est en contact avec le sol pendant 0,036 s, quelle est son accélération moyenne durant cette période?
17. À partir des données envoyées par l'engin spatial Voyager en 1979, l'ingénieur Linda Morabito a découvert sur Io, un satellite de Jupiter, la première activité volcanique extraterrestre. Le panache de l'éruption s'élevait à 280 km d'altitude environ. Sachant que l'accélération de la pesanteur à la surface d'Io vaut $1{,}8\ m/s^2$ et supposant qu'elle demeure constante, déterminer : (a) la vitesse à laquelle les débris étaient projetés (b) le temps qu'il leur fallait pour atteindre la hauteur maximale.

B.4.2 Cours intitulé “mouvement circulaire uniforme”

Ce polycopié de cours comprend l'introduction à la force de gravitation, reproduite à la figure B.32, et une série d'exercices, reproduite à la page suivante.

1.2 *La force de gravitation*

La loi classique de la gravitation universelle a été formulée par Newton en 1685 *sur la base des connaissances expérimentales de son temps dans le but d'expliquer le mouvement des planètes autour du Soleil.*

Cette loi énonce que le module de la force gravitationelle F entre deux corps de masse m et M, séparés par une distance r est:

$$F = G\ \frac{mM}{r^2}$$

La distance r est celle entre les centres de gravité des deux objets massifs et G est appelée la constante de gravitation universelle $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \ Nm^2/kg^2$



Applications :

1. Calculer la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre.

2. Extraire l'expression de g et calculer sa valeur.

On donne: *Données Astronomiques*

$M_{Terre} =$ .....kg
$R_{Terre} =$ .....m
$M_{Lune} =$ .....kg
$R_{Lune} =$ .....m
$d_{Terre-Lune} =$ .....m

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

FIGURE B.32 – Cours sur le mouvement circulaire uniforme - La force de gravitation.

Année 2006-2007 *Classe : 2 A*

Série 3:

Mouvement circulaire uniforme MCU
la force de gravitation, les lois de Kepler

Exercice 1:

Quelle est la force de la gravitation entre deux corps de 100 kg se trouvant à une distance de 1 m l'un de l'autre ?

Comment change cette force si la distance diminue de moitié ?

Exercice 2:

Quelle distance sépare deux pétroliers de masse, respectivement $1.5 \cdot 10^5$ *tonnes et* $2.5 \cdot 10^5$ *tonnes, sachant que l'intensité de la force de gravitation qui agit entre eux est de 174 N.*

Exercice 3:

a) Déterminez l'intensité des forces de gravitation entre la Terre et la Lune.

b) Déterminez l'intensité des forces de gravitation entre la Terre et le Soleil.

c) Comparez ces deux intensités.

Exercice 4:

Où faut-il placer un corps de masse m pour que la force de la gravitation de la Lune compense la force de la gravitation de la Terre sur ce corps ?

Exercice 5:

Calculez la force de la pesanteur d'une masse marquée (masse étalon) de 2,000 kg à l'équateur et au pôle de la Terre.

Calculez la différence entre ces deux forces de pesanteur. Pouvez-vous expliquer cette différence ?

$g_{equateur} = 9.780\ N/kg$ et $g_{pole} = 9.830\ N/kg$

Exercice 6:

On fait tournoyer une pierre de 0,5 kg à l'aide d'un fil de 80 cm. Calculer la force exercée par le fil si la pierre tourne à raison de 1 tour par seconde. On néglige la pesanteur.

Exercice 7:

Une voiture entre dans un virage de 30 m de rayon. L'adhérence maximale des pneus est de 4'000 N. Calculer la vitesse maximale à laquelle la voiture peut négocier cette courbe sans déraper.

Exercice 8:

La lune I_o de Jupiter est en orbite circulaire de rayon $4{,}22 \cdot 10^5$ *km avec une période de 1.77 jour. Calculer la masse du Jupiter à l'aide de ces données.*

Exercice 9:

Calculer la période de la station orbitale internationale sachant qu'elle vole au dessus de nos têtes à une altitude de 300 km

Données Astronomiques

$M_{Soleil} = 1.989 \cdot 10^{30}\ kg$
$R_{Soleil} = 6.95 \cdot 10^{8}\ m$
$M_{Terre} = 5.974 \cdot 10^{24} kg$
$R_{Terre} = 6.371 \cdot 10^{6}\ m$
$d_{Terre-Soleil} = 1.5 \cdot 10^{11}\ m$
$M_{Lune} = 7.350 \cdot 10^{22}\ kg$
$R_{Lune} = 1.738 \cdot 10^{6}\ m$
$d_{Terre-Lune} = 3.844 \cdot 10^{8}\ m$
$M_{Mars} = 0.1074 \cdot M_{Terre}$
$R_{Mars} = 0{,}532 \cdot R_{Terre}$
$d_{Mars-Soleil} = 2.279 \cdot 10^{11}\ m$
$M_{Jupiter} = 317.9 \cdot M_{Terre}$
$R_{Jupiter} = 11.27 \cdot R_{Terre}$
$d_{Jupiter-Soleil} = 7{,}78310^{11}\ m$

B.4.3 Cours intitulé “travail et énergie”

Ce polycopié de cours est suivi d’une série d’exercices. Le tout est reproduit aux pages suivantes.

Chapitre 2

Travail et énergie

2.1 *Le travail d'une force constante*

2.1.1 *Introduction*

En principe, les lois de Newton permettent de résoudre tous les problèmes de la mécanique classique. Il faut alors connaître les positions, vitesses initiales des particules d'un système ainsi que toutes les forces agissent sur elles et on peut prévoir l'évolution du système. Dans la pratique, on connaît souvent mal les forces qui agissent dans une situation donnée. Une approche différente permet de résoudre les problèmes plus simplement. On s'appuie à ce moment sur les notions de travail et d'énergie.

2.1.2 *Définition*

Le travail est le changement de l'énergie d'un système, dû à l'application d'une force, agissant sur une distance. Au coeur de ce concept est la notion du mouvement contre une résistance, qu'elle soit fournie par la pesanteur, un frottement, une inertie ou n'importe quelle autre force.

Le travail d'une force constante, appliquée à un corps, est le produit de la composante de la force dans la direction du mouvement par la distance sur laquelle la force agit:

$$W(\overrightarrow{F}) = \overrightarrow{F} \cdot \overrightarrow{s} = F \cdot s \cdot cos(\theta)$$

où θ est l'angle entre $\overrightarrow{F}$ et $\overrightarrow{s}$.

2.1.3 *Unité et le signe du travail*

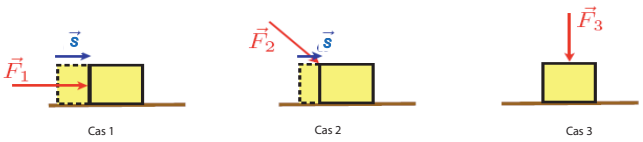
L'unité SI du travail est le newton-mètre, ou le Joule :

$[W] =$ .....

Le travail sur un objet est défini positif si le point d'application de la force se déplace dans la direction de la force. Le travail est négatif dans le cas contraire.

2.1.4 *Exemples*

- *Exemple 1*



Calculez dans chaque cas le travail W ?

- Exemple 2 :

Quel est le signe du travail $W(\vec{P})$ dans chaque cas?

Lever un colis :

.....

Chute libre :

.....

Baisser un objet:

.....

- Exemple 3

Une personne porte un sac de 300 *kg en restant immobile. Calculez le travail effectué pendant* 10 *min.*

.....
.....
.....
.....
.....
.....

2.1.5 *Exercice*

Une locomotive exerce une force de traction constante de 400 *kN sur un train qu'elle tire sur* 500 *m.*

a) Quel est le travail W_1 effectué par le moteur sur le train?

b) Arrivant vers une gare, la locomotive exerce une force de freinage de 100 *kN dans la direction opposée au mouvement, pour arrêter le train au bout de* 1000 *m. Quel est le travail W_2 alors effectué?*

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

2.1.6 *Le travail net ou le travail total*

Lorsque plusieurs forces agissent sur un corps, on peut calculer le travail effectué par chacune d'entre elles. Le travail net (total) effectué sur le corps est égal à la somme algébrique des travaux.

$$W_{NET} = W_{total} = \sum W_i = W_1 + W_2 + W_3 + ... = \overrightarrow{F}_1 \cdot \overrightarrow{s}_1 + \overrightarrow{F}_2 \cdot \overrightarrow{s}_2 + \overrightarrow{F}_3 \cdot \overrightarrow{s}_3 + ...$$

Remarque

Si le corps subit une translation pure (pas de rotation ni de déformation), le travail net est alors :

$$W_{NET} = \overrightarrow{F}_{NETTE} \cdot \overrightarrow{s}$$

2.1.7 ***Exercice***

Une skieuse de 60 *kg glisse sur* 200 *m vers le bas d'une pente inclinée de* 25^o.

Quel le travail de chaque force appliquée sur la skieuse et en déduire le travail total ?
On donne l'intensité de la force du frottement : $f = 20N$

2.2 *L'energie*

2.2.1 *Introduction*

Le mot énergie est d'un usage quotidien très répandu. Pourtant, beaucoup seraient embarrassés pour en donner une définition précise. Ce mot suggère la force et le mouvement. Au sens populaire, on la confond avec la puissance. Invisible et intouchable, l'énergie ne peut être qu'imaginée par l'esprit humain.

L'intérêt du concept d'énergie en physique vient du fait qu'au cours des différentes transformations qu'elle peut subir, l'énergie se conserve. Ceci est un principe fondamental de la physique.

De célèbres scientifiques ont tenté de définir l'énergie :

Poincaré : " Il y a une quantité numérique qui ne change pas lorsque quelque chose se produit ".

Feynman: " L'énergie se conserve, mais on ne sait pas ce que c'est !

Rankine: " L'énergie, c'est la capacité d'effectuer des changements, c'est une caractéristique commune aux différents états de la matière auxquels se rapportent les branches de la physique ".

Enfin, le mot énergie est sur toutes les lèvres, il fascine ou fait peur. L'énergie est à l'origine de tous les prodiges et de tous les maux que l'Homme a créés sur sa planète. Elle est l'enjeu de bien des débats politiques ou économiques. Elle fait partie intégrante de notre vie de tous les jours, elle a un rôle social et l'Homme ne pourra évoluer qu'en s'en préoccupant.



Portion du tunnel de l'accélérateur de particules du CERN.

2.2.2 *L'energie cinétique*

Pour comprendre le concept de l'énergie cinétique, on considère un corps de masse m sous l'influence d'une force constante F sur une distance s

Application

La vitesse de décollage d'un avion de ligne Boeing 737*, pesant* $2.2\ 10^6\ N$*, est de* $268\ m/s$*. Calculer alors son énergie cinétique.*

Sachant qu'un kg de TNT produit une énergie de $4.6\ 10^6\ J$*, quelle est la masse de TNT équivalente à cette énergie cinétique?*



2.3 *Puissance*

2.3.1 *Puissance mécanique moyenne*

La puissance mécanique traduit le rythme auquel un moteur délivre une quantite de travail. Pour un quantité de travail ΔW effectué dans un intervalle de temps Δt , la puissance moyenne est définie par :

$$P_{moy} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

On peut écrire aussi la puissance a partir de la force moyenne effectuant le travail :

$$P_{moy} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\vec{F} \cdot \vec{s}}{\Delta t} = \vec{F} \cdot \frac{\vec{s}}{\Delta t} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

L'unité de la puissance et le Watt : W

2.3.2 *Conversions d'unités et ordre de grandeur*

Transformations à connaître :

FACTEURS DE CONVERSION

1 cal = 4,185 J
1 kWh = 3'600 kJ = 860 kcal
1 tep = 10 Gcal = 1010 cal
1 tep = 41,85 GJ = 4,185 1010 J
1 TJ = 23,895 tep
1 TWh = 0,086 Mtep

LEGENDE

tep : tonne équivalent pétrole
tec : tonne équivalent charbon
J : Joule
cal : Calories
W : Watt
h : heures

Préfixes, symboles et ordre de grandeur :

Préfixes	*kilo*	*méga*	*giga*	*tera*	*peta*	*exa*
Symboles	*k*	*M*	*G*	*T*	*P*	*E*
Multiples	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}

Exemples de puissances mécaniques usuelles

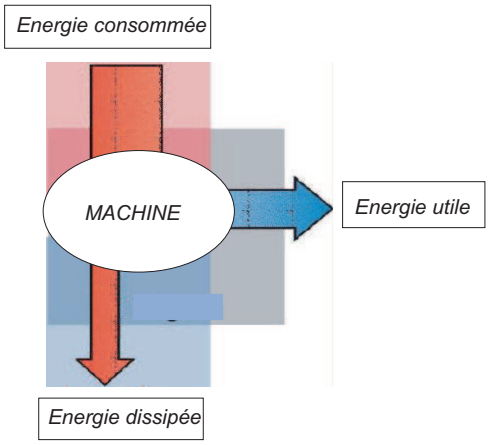
Mécanisme d'une montre	0,001 W
Homme	100 W
Grue	15 kW
Automobile	10 à 200 kW
Eolienne	30 à 300 kW
Locomotive	1000 à 8000 kW
Réacteur d'avion	30 000 kW
Centrale hydroélectrique de Verbois	88 000 kW
Chutes du Rhin	147 000 kW
Centrale marémotrice de la Rance	240 000 kW
Centrale hydroélectrique de la Grande-Dixence	840 000 kW

2.4 *Rendement et transformation d'énergie*

Idéalement, lors d'une transformation d'énergie par un système, il n'y a que deux formes d'énergies. L'énergie consommée est la forme d'énergie qui se transforme en l'énergie utile. L'énergie utile est la forme d'énergie obtenue par transformation de l'énergie consommée.

Dans la réalité, il y a toujours une troisième forme d'énergie obtenue, qui n'est pas désirée, mais inévitable. On l'appelle l'énergie non utile (énergie dissipée).

On peut représenter cette transformation d'énergie par le schéma suivant :



Le rendement d'une machine est le rapport :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{consommee}}$$

ou bien;

$$\eta = \frac{E_{utile}}{E_{consommee}}$$

Le rendement s'éxprime en pour-cent (sans unité). L'énergie étant conservée, l'énergie consommée est égale à la somme des énergies utiles et dissipées.

$$E_{consommee} = E_{utile} + E_{dissipee}$$

Exemples de rendements :

Centrale thermique ou nucléaire 30%
Centrale hydroélectrique 85%
Moteur d'automobile, réacteur d'avion 20-30%
Moteur électrique 75%-95%
Pile électrique 90%
Panneau solaire photovoltaïque 15%
Panneau solaire thermique 80%-90%
Ampoule 5 %
Tube au néon 20%

Année 2006-2007 *Classe : 2 A*

Série 4:

Travail et énergie

Exercice 1:

Calculez le travail de la force de 250 N *qu'un homme exerce pour tirer sur le sol un sac de* 65 kg *sur* 10 m*, si la force fait un angle de* 30^o *avec le sol.*

Exercice 2:

Dans le cas d'un mouvement circulaire, que pouvez-vous dire du travail de la force centripète $\overrightarrow{F}$ *?*

Exercice 3:

Une voiture de 1.3 *tonnes gravit une montagne en parcourant* 35 km *sur une route dont l'inclinaison moyenne est de* 6 *%. Le véhicule grimpe à vitesse constante et il subit une force de frottement constante de* 200 N.

Calculez le travail de chacune des forces qui agissent sur la voiture.

Exercice 4:

On pousse une voiture de 800 kg*, à vitesse constante de* 10 m/s*, sur une distance de* 500 m*. La force de frottement est constante, elle vaut 300 N.*

a) Calculer le travail requis pour pousser cette voiture en admettant que la route est horizontale.

b) Calculer le travail requis pour pousser cette voiture lorsqu'elle monte, la route est inclinée et forme un angle de $3{,}5^o$ *avec l'horizontale.*

Exercice 5:

Une sauterelle (de masse voisine de 3 g*) peut se propulser du repos à* 3.4 m/s *en* 4 cm*. Évaluez la puissance moyenne fournie par ses pattes.*

Exercice 6:

Un parachutiste en chute libre de masse 60 kg *tombe à la vitesse limite de* 55 m/s*. Quelle est la puissance dissipée par la résistance de l'air?*

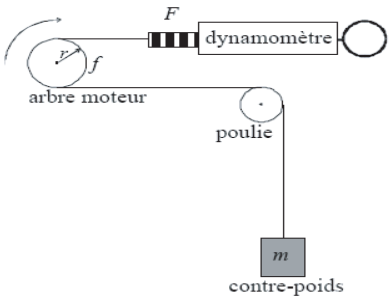
Exercice 7:

Un exercice vigoureux requiert un rythme métabolique (liberation d'énergie chimique emmagasinée) de 600 *kcal/h. Combien de temps faut-il pour perdre* 0.1 *kg si le métabolisme de* 1 *g de graisse libère* 9 *kcal (*3.76 10^4 *J)?*

Exercice 8:

Mesure de la puissance mécanique d'un moteur:

Pour mesurer la puissance d'un moteur, on freine l'arbre du moteur à l'aide d'un fil ou d'une sangle.



F: est la force mesurée sur le dynamomètre, cette force est parfois considérée comme nulle.
mg : est la force exercée sur le fil par le contrepoids.
f : est la fréquence de rotation du moteur en tours/s.
r: est le rayon de l'arbre moteur.

Quelle est la puissance mécanique de l'arbre (travail par unité de temps)

Exercice 9:

a) Ecrivez sept formes d'énergie .

b) Les factures de consommation d'électricité que reçoivent vos parents utilisent le kilowattheure kWh comme unité d'énergie. Consommer 1′000 *joules par seconde pendant une heure, correspond à consommer 1 kilowattheure. Combien de joules font 1 [kWh]? et Combien de [kWh] font 1 [tep]?*

c) Quel est le type d'énergie utilisé dans un barrage?

d) Quel est le type d'énergie stockée dans l'essence?

e) Quel est le type d'énergie stockée dans une pile?

f) Que dit le principe de conservation d'énergie?

Exercice 10:

Pour cuire une choucroute, en branchant la cuisinière sur la même puissance, il faut 60 minutes avec une marmite à vapeur et 150 minutes dans une casserole.

a) Quelle est l'économie de temps réalisée avec une marmite à vapeur?
b) Quel pourcentage d'économie d'énergie est réalisée avec une marmite à vapeur? c) Pour quelle raison une marmite à vapeur cuit-elle plus vite les aliments?

Exercice 11:

L'énergie contenue dans l'essence est de 3,4 10^7 $J/litre$. *On considère une automobile dont le taux de consommation est de* 12 $km/litre$ *à* 100 km/h. *Si la puissance mécanique fournie à cette vitesse est de* 18.5 kW, *quel est le rendement du moteur*

Exercice 12:

L'énergie électrique utilisée par une lampe à incandescence provient d'une centrale thermique. De la chaleur produite à la centrale, à la lumière (rayonnement visible) produite par la lampe, indiquer les transformations d'énergie et le rendement global.

Exercice 13:

Une grue est équipée d'un moteur de 5 kW. *Combien de temps lui faut-il pour soulever une charge de 1 tonne à une hauteur de* 12 m *si le rendement du moteur est de* 80 $\%$

Exercice 14:

Le moteur de la Porsche 911 *développe une puissance de* 331 kW *et atteint une vitesse de* 100 km/h, *à partir du repos, en* 4.3 s. *Lors d'une telle accélération, quel est le rendemant de la voiture si sa masse est de* 1980 kg?



B.4.4 Cours intitulé “les lois de la dynamique”

Ce polycopié de cours est composé des trois pages reproduites par les figures B.33-B.35, et d'une série d'exercices, reproduite à la suite. Le travail écrit intitulé “cinématique et forces” est également reproduit dans son intégralité, à la suite de la série d'exercices.

La première loi de Newton

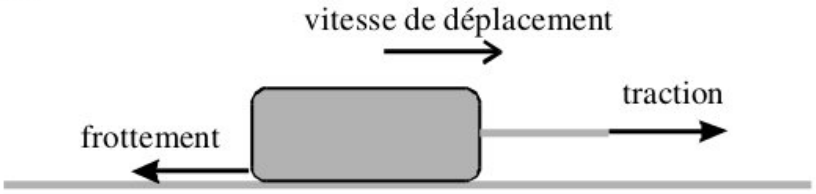
En 1687, Newton énonça sa première loi du mouvement, qu'il déduit des travaux de Galilée et de Descartes :

Première loi de Newton — Tout corps conserve son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins que des forces n'agissent sur lui et ne le contraignent à changer d'état.

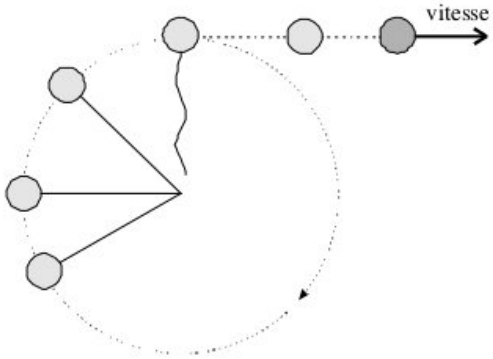
Cette loi fait intervenir une propriété appelée inertie :

Inertie — L'inertie d'un corps est sa tendance à résister à toute variation de son état de mouvement.

En d'autres termes, un objet a tendance à rester au repos s'il est au repos et à rester en mouvement à vitesse constante s'il est en mouvement.
La première loi implique donc qu'une variation de vitesse (une accélération) est produite par une force.



Lorsqu'on exerce une traction sur le bloc représenté, on peut le déplacer sur la droite. Il est soumis à deux forces, l'une de traction dans la ficelle, l'autre de frottement sur le sol. Si les modules de ces forces sont identiques, le bloc se déplace à vitesse constante.



Si on fait tourner une pierre attachée à une corde, sa trajectoire sera circulaire, la vitesse de la pierre sera dirigée selon la tangente en tout point. A cause de son inertie, la pierre a tendance à poursuivre son chemin en ligne droite. La traction dans la ficelle l'empêche de suivre ce trajet naturel d'inertie.
Si la corde lâche, la pierre ne sera plus soumise à aucune force et ainsi, elle obéira à la première loi de Newton.

La force est perçue comme une poussée ou une traction. On peut distinguer des forces de contact : exercées par les cordes, des ressorts, de frottement et des forces d'action à distance : la gravitation comme l'interaction de la Terre et du Soleil, les forces électriques ou magnétiques.

FIGURE B.33 – Cours théorique - première loi de Newton.

Année 2006-2007 *Classe : 2 A*

Série 2:

Les lois de la dynamique

Exercice 1:

Une voiture roule en ligne droite à vitesse constante. La force qui lui permet de maintenir sa vitesse vaut 200 N. *Calculez la force de frottement.*

Exercice 2:

Une force de 5 N *accélére un chariot de* 15 kg.

Quelle est la vitesse aprés trois secondes sachant qu'il était initialement arrêté?

Exercice 3:

La poussée totale des réacteurs d'un Boeing 747 *est de* $8.8\ 10^5\ N$. *La masse de l'avion au décollage est de* $3{,}0\ 10^5\ kg$.

Quelle est son accélération au décollage ?

Si l'avion part du repos, quelle sera sa vitesse aprés 10 s *? On néglige les forces de frottement.*

Exercice 4:

Une automobile de 1200 kg *est sur une plaque de verglas (pas de frottement). On lui attache deux cordes et on exerce les forces* $F_1 = 800\ N$ *à* $35°$ *nord par rapport à l'est et* $F_2 = 600\ N$ $25°$ *sud par rapport à l'est.*

Quelle est l'accélération de l'auto ?

Exercice 5:

Calculer la force constante nécessaire pour faire accélérer une voiture de 1225 kg *dans chacun des cas suivants :*

(a) elle part du repos et atteint 96 km/h *en* 10 s;

(b) elle freine, passant de 112 km/h *au repos en 64* m.

Quelle est, dans chaque cas, l'origine de la force ?

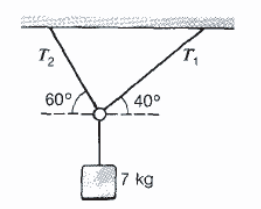
Exercice 6:

Une voiture (de masse $m = 2000\ kg$) freine sur une distance de $50\ m$ pour éviter une collision avec un mur. Sa vitesse initiale étant de $50\ km/h$.

Calculez son accélération et la force qui lui permet de s'arrêter.

Exercice 7:

Un bloc de $7\ kg$ est suspendu par deux cordes. Trouvez la tension de chaque corde (voir figure).



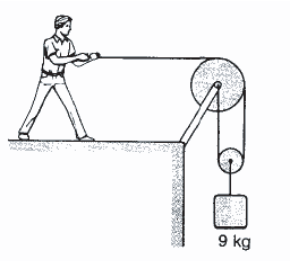
Exercice 8:

Un bloc de $9\ kg$ est retenu par un système de poulies (figure). Quelle force la personne doit-elle exercer dans les cas suivants:

(a) pour garder le bloc au repos;

(b) pour le faire descendre à $2\ m/s$;

(c) pour le faire monter avec une accélération de $0{,}5\ m/s^2$.



Exercice 9:

Un camion remorque une voiture. La corde de remorquage supporte au plus une force de 1,5 kN. *La masse de la voiture est de* 800 kg.

Quelle accélération maximum le camion peut-il se permettre?

Dans ce cas, quelle force de retenue la voiture exerce-t-elle sur le camion?

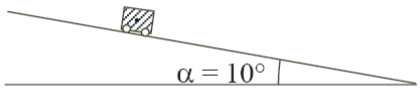
Exercice 10:

Un chariot de 400 kg *descend une pente inclinée de* 10°.

Dessinez toutes les forces qui agissent sur ce chariot.

La force motrice et la force de frottement sont nulles. Notez ci-dessous l'intensité de chaque force.

Quelle est l'accélération de ce chariot?



Année 2006-2007 *Classe : 2 A*

Nom:

Prénom:

Travail écrit N^o 1
Cinématique et forces

Exercice 1: (2pts)

On définit le travail W effectué par une force constante $\overrightarrow{F}$ dont le point d'application subit un déplacement $\overrightarrow{d}$ par :

$$W = \overrightarrow{F} \cdot \overrightarrow{d} = F \cdot d \cdot \cos(\theta)$$

où θ est l'angle entre $\overrightarrow{F}$ et $\overrightarrow{d}$.

Quelle est en (SI) l'unité du travail W ?

Exercice 2: (3pts)

On dit qu'un pendule "bat la seconde" lorsqu'il effectue une demi-oscillation en une seconde.

a) Quelle est la période de ce pendule ?

b) Calculez la longueur l de ce pendule en un lieu où l'accélération de la pesanteur vaut $9.81\ \ m/s^2$ *?*

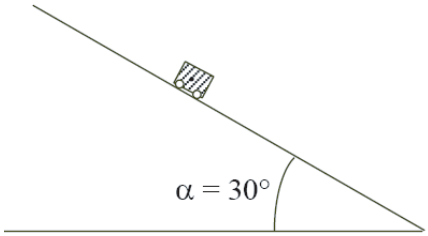
On donne :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Exercice 3: (7pts)

Un chariot de 400 kg *descend une pente inclinée de* 30^o.

a) Dessinez toutes les forces qui agissent sur ce chariot. La force motrice est nulle. La force de frottement égale 1500 N.



b) Notez ci-dessous l'intensité de chaque force.

b) Quelle est l'accélération de ce chariot?

c) Sachant que le tracteur part sans vitesse intiale, quelle sera la distance parcourue aprés une minute

Exercice 4: (3pts)

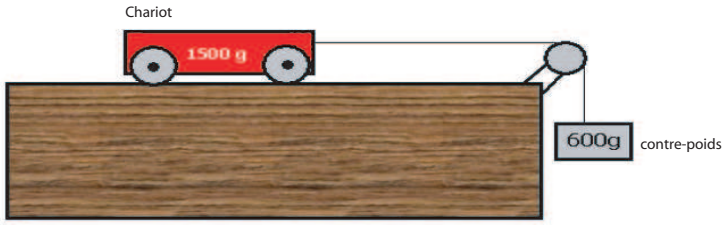
Lors d'une parade, un char de 8000 kg *est tiré par un camion. Sachant qu'il existe une force de frottement de* 1000 N *entre les pneus du char et l'asphalte.*

a) Faites une esquisse de la situation en dessinant les forces appliquées sur le char ?

b) Quelle force motrice devra déployer le camion pour accélérer le char à 0,3 m/s^2 *?*

Exercice 5: BONUS (2pts)

Quelle serait l'accélération obtenue sur le montage suivant?. On néglige les forces de frottement et on donne $g = 9.81\ \ N/kg$



La masse est définie intuitivement par Newton comme la quantité de matière d'un corps. Cette définition ne permet pas d'établir des comparaisons entre les corps. C'est pourquoi la première loi de Newton nous donne une meilleure définition :

Masse

La masse d'un corps est la mesure de son inertie, c'est-à-dire de sa résistance aux variations de vitesse.

Une fois l'étalon de mesure choisi, le kilogramme, on peut le comparer à n'importe quel autre pour déterminer la masse de n'importe quel autre corps.

Deuxième loi de Newton

$$\vec{F}_{nette} = m\vec{a}$$

L'unité de la force est le **newton** noté **N**.

$$1N = 1kg \cdot \frac{m}{s^2}$$

La force nette ou force totale est la somme des forces qui agissent sur un objet : $\vec{F}_{nette} = \sum \vec{F}$

Exemples

1 La poussée totale des réacteurs d'un Boeing 747 est de $8{,}8 \cdot 10^5\ N$. La masse de l'avion au décollage est de $3{,}0 \cdot 10^5\ kg$. Quelle est son accélération au décollage ? Si l'avion part du repos, quelle sera sa vitesse après 10 s ? On néglige les forces de frottement.

2 Une automobile de 1200 kg est sur une plaque de verglas (pas de frottement). On lui attache deux cordes et on exerce les forces $F_1 = 800\ N$ à 35° nord par rapport à l'est et $F_2 = 600\ N$ à 25° sud par rapport à l'est. Quelle est l'accélération de l'auto ?

Le poids

Le poids d'un objet est la force gravitationnelle qui agit sur lui. $m\vec{g}$

On confond souvent les notions de masse et de poids. La première est la mesure de l'inertie d'un objet, la seconde la force gravitationnelle exercée sur un corps.
La masse est une grandeur scalaire intrinsèque pour une objet. Le poids est une grandeur vectorielle, qui dépend de l'endroit où nous sommes situé (en fait dépend de g).

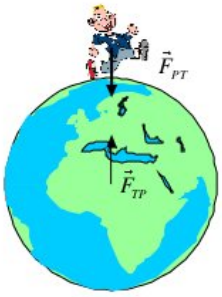
Une force est toujours exercée par un corps sur un autre. On ne peut pas parler de la force d'un corps. On pousse une voiture qui nous résiste.
$\vec{F}_{AB}$ désigne la force exercée *sur* l'objet A par l'objet B.

Troisième loi de Newton

Si une force est exercée par un objet sur un autre, une force égale en module est exercée par le second objet sur le premier, se sens opposé.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

FIGURE B.34 – Cours théorique - deuxième et troisième lois de Newton.



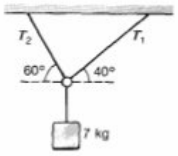
Il y a attraction entre l'homme et la Terre.

$\vec{F}_{TP}$ est la force subie par la Terre due au personnage.

$\vec{F}_{PT}$ est la force subie par le personnage due à la Terre.

Exercices.

1. Calculer la force constante nécessaire pour faire accélérer une voiture de 1225 kg dans chacun des cas suivants : (a) elle part du repos et atteint 96 km/h en 10 s ; (b) elle freine, passant de 112 km/h au repos en 64 m. Quelle est, dans chaque cas, l'origine de la force ?
2. Une personne baisse de 15 cm son torse de 50 kg et saute verticalement. Si le torse s'élève 40 cm au dessus de sa hauteur normale, trouver la grandeur de la force exercée sur le torse au niveau de la hanche par la partie inférieur du corps.
3. Une fusée *Saturn V* a une masse de $2{,}7 \cdot 10^6\ kg$ et une poussée de $3{,}3 \cdot 10^7\ N$. Quelle est son accélération verticale initiale?
4. Une fillette tombe d'une plate-forme située à $1{,}0\ m$ au-dessus du sol. Calculez la force exercée sur son torse de $40\ kg$ lorsqu'elle touche le sol.- (a) en pliant les genoux et en arrêtant le torse sur 30 *cm*; (b) avec raideur en arrêtant le torse sur 4 *cm*.
5. Un bulldozer jouet (B) de 0,7 kg pousse une petite voiture (V) de 0,2 kg qui roule librement sur le sol (S) avec une accélération de $0{,}5\ m/s^2$. Déterminez la valeur et le sens de la composante horizontale de chacune des forces suivantes: (a) F_{BS} ; (b) F_{VS} ; (c) F_{BV}. (F_{AB} désigne la force exercée sur *A* par *B*.)
6. Une parachutiste de 60 kg et son parachute de 7 kg tombent à une vitesse constante de 6 m/s. Déterminez: (a) la force exercée par le parachute sur la parachutiste; (b) la force exercée par l'air sur le parachute. (On néglige la force exercée par l'air sur la parachutiste)
7. Un bloc de 7 kg est suspendu par deux cordes. Trouvez la tension de chaque corde (voir figure).





8. Un garçon de masse 25 kg et une fillette de masse 20 kg sont attachés par une corde de masse négligeable (figure). Ils se déplacent horizontalement sur une patinoire sans frottement. Le garçon est tiré par une force horizontale de 200 N. Déterminez leur accélération et la tension dans la corde.
9. Un bloc de 9 kg est retenu par un système de poulies (figure). Quelle force la personne doit-elle exercer dans les cas suivants: (a) pour garder le bloc au repos; (b) pour le faire descendre à 2 m/s; (c) pour le faire monter avec une accélération de $0{,}5\ m/s^2$

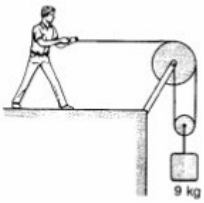


FIGURE B.35 – Cours théorique - situations et problèmes.

Annexe C

Reproduction des traces empiriques

Sommaire

C.1 Chronologie de la séquence effective . . . 871
C.2 Inventaire des traces enregistrées au fil de la séquence . . . 873
C.3 Productions écrites des élèves . . . 875
C.4 Graphes d'argumentation produits sur *Digalo* . . . 905
C.4.1 Groupes de la demi-classe A . . . 905
C.4.2 Groupes de la demi-classe A . . . 908
C.5 Extraits du *mémoire professionnel* de l'enseignant . . . 911
C.6 Transcriptions . . . 915
C.6.1 Situation de malentendu #5 . . . 915
C.6.2 Situation de malentendu #6 . . . 916
C.6.2.1 Synopsis . . . 917
C.6.2.2 Premier épisode . . . 918
C.6.2.3 Deuxième épisode . . . 921
C.6.2.4 Troisième épisode . . . 923
C.6.2.5 Quatrième épisode . . . 924
C.6.2.6 Cinquième épisode . . . 926

C.1 Chronologie de la séquence effective

Le tableau C.1 (ci-dessous) représente chronologiquement les activités de la séquence effective en fonction du calendrier.

Date	Demi-classe	Activités effectuées par les élèves **en gras** : activité de la séquence planifiée
15.08.2006		Leçon annulée : semaine de la rentrée des classes
22.08.2006	A	Introduction à la mécanique
29.08.2006	B	Introduction à la mécanique
05.09.2006	A	**Passation du pré-questionnaire en individuel**
12.09.2006	B	**Passation du pré-questionnaire en individuel**
19.09.2006 26.09.2006		Leçon annulée : séjours linguistiques
03.10.2006 10.10.2006		Vacances
17.10.2006	A	Leçon sur le pendule
24.10.2006		Leçon annulée
31.10.2006	A	**Amorce sur le toboggan à billes** **Activités 1 et 2 (inachevée) avec le logiciel *Marbles Move***
07.11.2006	B	Leçon sur le pendule
14.11.2006		Leçon annulée
21.11.2006	A	**Activités 2, 3 et 4 (inachevée) avec le logiciel *Marbles Move***
28.11.2006	B	**Activités 1 et 2 (inachevée) avec le logiciel *Marbles Move***
05.12.2006	A	**Activités 4 et 5 avec le logiciel *Marbles Move***
12.12.2006	B	**Activités 2, 3 et 4 avec le logiciel *Marbles Move*** L'activité 5 est donnée en devoirs
16.01.2007	A	**Activité de discussion sur le pré-questionnaire avec le logiciel *Digalo***
23.01.2007	B	**Activité de discussion sur le pré-questionnaire avec le logiciel *Digalo***
30.01.2007	A	**Activité d'expérimentation sur le pré-questionnaire** Synthèse effectuée par l'enseignant
06.02.2007	B	**Activité d'expérimentation sur le pré-questionnaire** Synthèse effectuée par l'enseignant
13.02.2007	A	**Synthèse effectuée par l'enseignant sur les deux questionnaires**
27.02.2007	B	**Synthèse effectuée par l'enseignant sur les deux questionnaires**

TABLE C.1 – Présentation chronologique de la séquence effective.

C.2 Inventaire des traces enregistrées au fil de la séquence

La figure C.2 présente un inventaire des traces effectivement disponibles, compte tenu des impondérables (absences d'élèves. La légende des abréviations et couleurs se trouve dans la figure C.1 ci-dessous.

Légende	
E	Données écrites
M	Données sous forme de carte argumentative (Digalo)
A	Enregistrement Audio
(a)	Enregistrement Audio incomplet
A+V	Enregistrement audio et vidéo séparé
V	Enregistrement audio-vidéo
	Données manquantes pour des raisons techniques
	Données manquantes en raison de l'absence d'un-e élève

FIGURE C.1 – Légende de l'inventaire des traces (figure C.2).

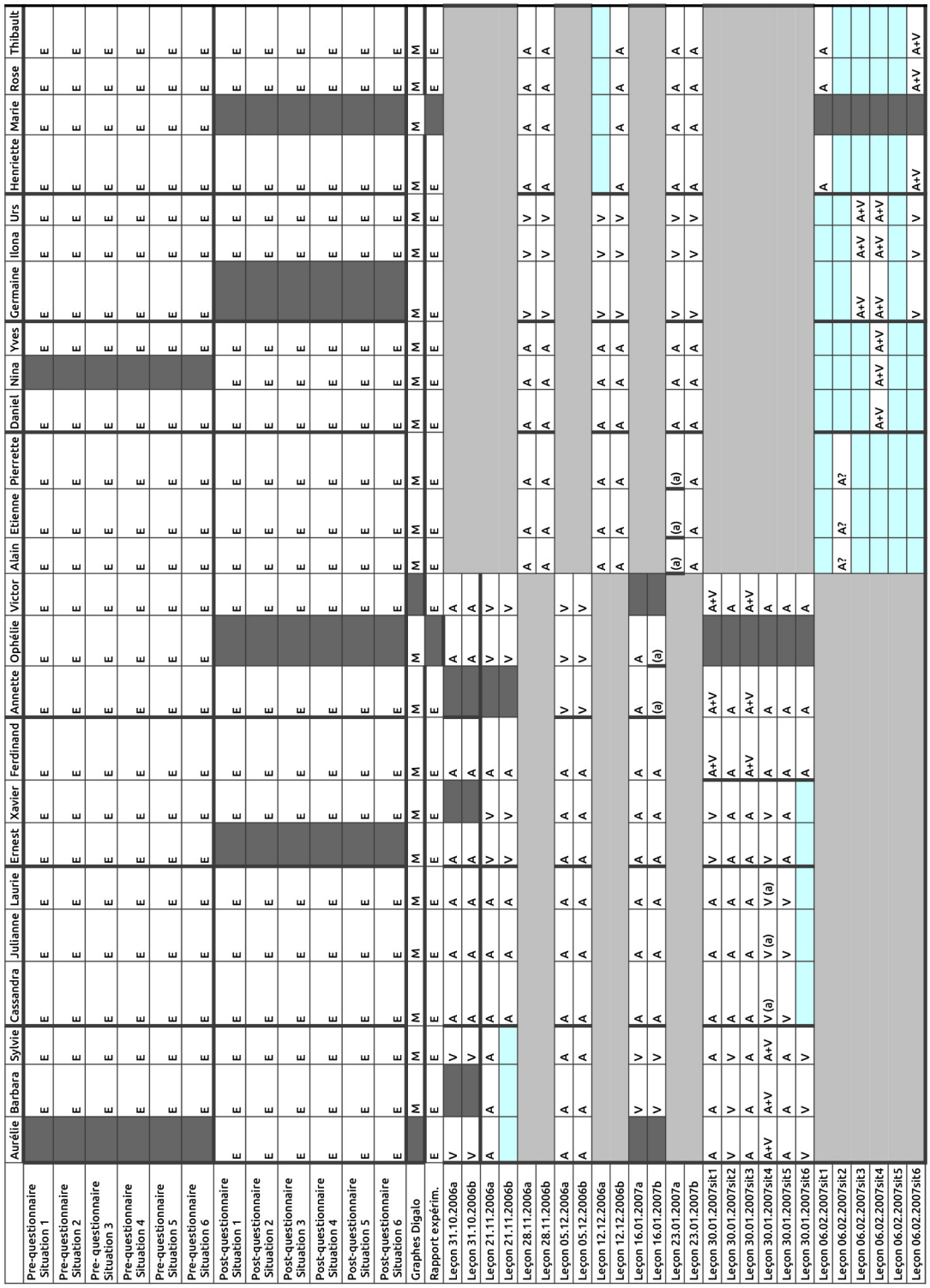


FIGURE C.2 – Inventaire des traces disponibles par type et par élève.

C.3 Productions écrites des élèves

Les tableaux des prochaines pages reproduisent les discours écrits par les élèves aux pré-questionnaire et post-questionnaires, aux exercices avec le logiciel *Marbles Move*, dans les interventions sur *Digalo* et dans leurs rapports expérimentaux. Les dessins et autres inscriptions non discursives n'ont pas été reproduites.

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 1A »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 1B »
A	abs	Aurélie	La bille immobile gicle sur la gauche et la bille partant du haut d'une pente après avoir percuté la bille immobile part aussi sur la gauche mais avec une plus grande vitessse.	1er phase
		Barbara		
		Sylvie	Quand la bille numéro1 touche la bille 2, la bille 2 part très rapidement dans le même sens que la bille 1, ex la bille 1 continue à rouler mais bcp moins vite.	_
	cjl	Cassandra	la bille no1 partant de la pente vient percuter la bille no2 et lui donne une impulsion qui la fait rouler à la même vitesse. Au moment du choc la bille no1 s'arrête une fraction de seconde puis continue à rouler.	Phase 1: la bille 1 roule en direction de la bille 2. Phase 2: en percutant la bille 2 cette dernière se met à rouler et la bille 1 s'arrête. Phase 3: la bille 2 roule et la bille 1 continue à rouler.
		Julianne	La bille no1 fonce dans la bille no2 et lui donne l'impulsion qui l'a fait rouler à la même vitesse. Au moment du choc, la bille no1 s'arrête une fraction de seconde puis continue de rouler.	Phase no1: la bille no1 roule en direction de la bille no2. Phase no2: en percutant la bille no2 cette dernière se met à rouler et la bille no1 s'arrête. Phase no3: la bille no2 roule et la bille no1 continue à rouler
		Laurie	La bille no1 vient percuter la bille no1 et lui donne une impulsion qui la fait rouler à la même vitesse. Au moment du choc la bille no1 s'arrête une fraction de seconde puis accélère	Phase 1:La bille no1 roule en direction de la bille no2. Phase 2: En percutant la bille no2, la bille no1 s'arrête et la bille no2 continue le même chemin et à la même vitesse que la bille no1. Phase 3: La bille no1 s'accélère gentillement.
	efx	Ernest	La bille no1 perd de sa vitesse mais continue cependant de rouler. La bille no2 part avec la vitesse initiale de la bille no1	Phase 1: phase de départ où on lâche la bille. Phase 2: phase de choc. Phase 3: phase d'après-choc où les billes continue gaiement leur voyage dans ce monde cruel à vitesse différente.
		Xavier		
		Ferdinand	La bille no1 perd de sa vitesse mais continue cependant de rouler. La bille no2 part avec la vitesse initiale de la bille no1	Phase 1: phase de départ où on lâche la bille. Phase 2: phase de choc. Phase 3: phase d'après-choc où les billes continue gaiement leur voyage dans ce monde cruel à vitesse différente.
	äov	Annette		
		Ophélie	La bille lancée (m1) heurtera m2 qui heurteras m3. On pourra dès lors observer une dénivellation de vitesses, comme ceci Vm3>Vm2>Vm1. Dans certains cas m1 s'immobilise sa vitesse étant parfois très proche de 0 dû également à l'inconstance du rail. m1=m2=m3.	1e phase: m1 est lancée m2 et m3 immobiles 2e phase: m1 heurte les autres très très bref moment d'immobilité 3e phase: Vm1<Vm2>Vm3
		Victor	La bille lancée (m1) heurtera m2 qui heurteras m3. On pourra dès lors observer une dénivellation de vitesses, comme ceci Vm3>Vm2>Vm1. Dans certains cas m1 s'immobilise sa vitesse étant parfois très proche de 0 dû également à l'inconstance du rail. m1=m2=m3.	1e phase: m1 est lancée m2 et m3 immobiles 2e phase: m1 heurte les autres très très bref moment d'immobilité 3e phase: Vm1<Vm2>Vm3
B	àép	Alain	La bille no1 va percuter la bille no2 et s'arrêter une fraction de seconde pour repartir avec une plus faible vitesse. La bille no2 prend la vitesse que la bille no1 avait avant de percuter.	P1: augmentation de la vitesse de la bille No1 sur le plan incliné P2: collision et départ immédiat de la bille No2 P3: départ de la bille No1 à vitesse plus lente et la bille No2 continue à plus garnde vitesse.
		Etienne	La bille no1 va percuter la bille no2 et s'arrêter une fraction de seconde pour repartir avec une plus faible vitesse. La bille no2 prend la vitesse que la bille no1 avait avant de percuter.	P1: augmentation de la vitesse de la bille No1 sur le plan incliné P2: collision et départ immédiat de la bille No2 P3: départ de la bille No1 à vitesse plus lente et la bille No2 continue à plus garnde vitesse.
		Pierrette	La bille no1 va percuter la bille no2 et s'arrêter une fraction de seconde pour repartir avec une plus faible vitesse. La bille no2 prend la vitesse que la bille no1 avait avant de percuter.	P1: augmentation de la vitesse de la bille No1 sur le plan incliné P2: collision et départ immédiat de la bille No2 P3: départ de la bille No1 à vitesse plus lente et la bille No2 continue à plus garnde vitesse.
	dny	Daniel	Lors de l'impact avec la bille no2, la no1 transmet toute sa force à la no2, la no1 devrait s'arrêter, mais au lieu de ça, elle perd de la vitesse au fur et à mesure et s'arrête enfin, sans doute à cause de la surface.	1: Accélération de la bille 2: Progression de la bille sur le plan à vitesse constante 3: Impact avec la bille no2, puis départ de la no2.
		Nina	Lors de l'impact avec la bille no2, la no1 transmet toute sa force à la no2, la no1 devrait s'arrêter, mais au lieu de ça, elle perd de la vitesse au fur et à mesure et s'arrête enfin, sans doute à cause de la surface.	1: Accélération de la bille 2: Progression de la bille sur le plan à vitesse constante 3: Impact avec la bille no2, puis départ de la no2.
		Yves	Lors de l'impact avec la bille no2, la no1 transmet toute sa force à la no2, la no1 devrait s'arrêter, mais au lieu de ça, elle perd de la vitesse au fur et à mesure et s'arrête enfin, sans doute à cause de la surface.	1: Accélération de la bille 2: Progression de la bille sur le plan à vitesse constante 3: Impact avec la bille no2, puis départ de la no2.
	giu	Germaine	La bille no1 descend la pente et va rencontrer la bille no2. Après le choc, la bille no1 s'arrête puis repart plus lentement. La 2ème bille, après le choc, repart avec la même vitesse que celle de la bille no1 au départ.	Phase 1: la bille no1 descend la pente Phase 2: les deux billes se rencontrent Phase 3: les deux bille roulent dans le même sens, mais la bille no1 va plus lentement.
		Ilona	La bille no1 descend la pente et va rencontrer la bille no2. Après le choc, la bille no1 s'arrête puis repart plus lentement. La 2ème bille, après le choc, repart avec la même vitesse que celle de la bille no1 au départ.	Phase 1: la bille no1 descend la pente Phase 2: les deux billes se rencontrent Phase 3: les deux bille roulent dans le même sens, mais la bille no1 va plus lentement.
		Urs	La bille no1 descend la pente et va rencontrer la bille no2. Après le choc, la bille no1 s'arrête puis repart plus lentement. La 2ème bille, après le choc, repart avec la même vitesse que celle de la bille no1 au départ.	Phase 1: la bille no1 descend la pente Phase 2: les deux billes se rencontrent Phase 3: les deux bille roulent dans le même sens, mais la bille no1 va plus lentement.
	hmrt	Marie	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.
		Henriette	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.
		Rose	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.
		Thibault	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.

Séq.	Groupe	Élève	Pré-questionnaire : item #3 – commentaire
A	abs	Aurélie	
		Barbara	B) -> force de frottement - vitesse C) -> force de gravitation
		Sylvie	f= force de soutien de la balle par le pied de l'homme F= force de l'homme pour l'élan de la balle
	cjl	Cassandra	a) force de gravité (attire la balle au sol) b) force de gravité +... c) force de gravité + force de frottement + force qui jette la balle (coup de pied)
		Julianne	A) force de gravité qui tient la balle sur le sol B) force de gravité + force de maintien de la balle sur le pied C) force de gravité qui fait que la balle ne s'envole pas force de puissance du pied qui pousse la balle
		Laurie	A) il y a la force de gravité qui attire le ballon au sol C) Il y a la force de gravité, la force qui la fait avancer et monter (c'est grâce à la personne) et la force de frottement qui la retient quand même D) Il y a la force de gravité
	efx	Ernest	A) force de pesanteur B) force du pied + force de pesanteur C) force du pied + force de pesanteur
		Xavier	A) Peut-être du vent (frottement de l'air) Frottement sol-ballon. B) g Frotement de l'air Force du shoot (F=air → / ← F=shoot) ça bloque, la force de l'air retient le shoot) C) la force impulsé par le shoot La force de frottement (retient la trajectoire de la balle). g S'il shoot avec de l'effet la force de frottement sera repartie différemment. Ad) Au moment du shoot, le ballon sera immobilisé très peu de temps. (→ force de l'air qui retient ← → shoot) immobile
		Ferdinand	(La boule de pétanque atteindra le sol avant car elle est plus lourde.) Si la forme est identique le frottement est le même et la forme d'attraction aussi => elles arrivent en même temps
	äov	Annette	A): aucune force ne s'exerce. B): c'est la force du pied qui s'exerce sur le ballon C): la force du mouvement imprimé par le pied sur la balle, et la force de gravité va également exercer une influence sur le
		Ophélie	A) force d'attraction, le ballon est attirée par le sol B) force de frottement + force d'attraction C) force de frottement + force d'attraction
		Victor	arc de cercle fait dans l'air par le ballon (force du pied qui s'oppose au frottement et à g)
B	àép	Alain	n= soutien g= gravité f= frottement p= poids h= homme
		Etienne	A) 1. g=a gravité 2. s=force de soutien B) g=a gravité F=le jeune qui frappe le ballon f=frottement de l'air C) g=gravité F=force donnée au ballon f=frottement de l'air
		Pierrette	Elles tomberont en même temps si on néglige le frottement de l'air, car la force de pseanteur (g) s'exerce sur les deux objets de manière identique. Le poids de l'objet ne change rien. La boule de pétanque tombera la première si on considère le frottement de l'air, car ce dernier va plus ralentir la balle de tennis à caus de son plus petit poids
	dny	Daniel	A) aucune force pouvant provoquer un mouvement n'est présente B) G1= pesanteur F1= force du coup de pied [en B] >G1 C) Le ballon va monter jusqu'à ce que F2=G2. Ensuite il va redescendre avec une accélération de 9.81m/s2
		Nina	
		Yves	_
	giu	Germaine	p= le poid S= la force de soutient M= force moteur
		Ilona	A) p: le poids B) p: le poids s: la force de soutien C) p: le poids a: l'accélération f: le frottement
		Urs	P= pesanteur R= force de réaction (le sol empêche de tomber plus bas) T= force de tension (donnée par le type) F= frottement
	hmrt	Marie	_
		Henriette	P= poids S= soutient
		Rose	P= poids s= force de soutient
		Thibault	A -> force de pesanteur B -> choc avec le pied C -> Ffrottement

Séq.	Groupe	Élève	Pré-questionnaire : item #4
A	abs	Aurélie	
		Barbara	b est <a car la canne n'est pas soulevée par le monsieur. C est < a car le plafond enlève une partie du poids (car on la colle au plafond). d est > a car toute la force de la canne est mise sur le pèse-personne alors que au a une partie de la force n'est pas là.
		Sylvie	a. pcq même situation. b. il n'y as plus que le poid de l'homme car la canne est posé sur le sol. c. le poid est le même, même si la canne touche le plafond. d. l'homme appuie sur le pèse pers. Ce qui augmente le poid pour le c: si l'homme appuie fortement contre le plafond le poid sera supérieur
	cjl	Cassandra	b est inférieur à a: parce qu'il pousse la canne en bas et ça le rend moins lourd. c est supérieur à a: parce qu'il pousse la canne contre le plafond et ça le pousse contre le bas. d est égale à a: parce que la canne est avec la personne sur le pèse-personne comme pour a
		Julianne	Les chariots arrivent les deux en même temps à l'arrivée, car les forces ne changent pas, elles restent pareil. Seule la masse change mais n'agit pas sur les forces
		Laurie	b<a: le poids de la canne est sur le sol et pas sur le pèse poids c>a: il exercce une pression sur le plafond ce qui lui fait exercer aussi une pression sur le pèse-personne. d=a: le pèse-personne va peser la personne et la canne comme à la situation a
	efx	Ernest	b) inférieure car la canne n'est pas comptée. c) supérieure car il appuie donc: indication=Pcanne+Phomme+force de l'homme. d) supérieure car il appuie, donc: même chose que ci-dessus.
		Xavier	a) a=a. b) le poids sera égal au poids de l'homme, la canne sera un appuie. (b<a). c) une force sera créée (pression/ impulsion [dessin]), donc g+f. Le poids de l'homme augmentera. (c>a) d) le poids de l'homme sera plus grand. (d=a)
		Ferdinand	le plus léger car il est plus propulsé par le ressort que le lourd
	äov	Annette	Dans la situation b), l'indication sur le pèse-personne est inférieure à celle de la situation a), parce que l'homme ne soulève pas la canne qui ne repose pas non plus sur le pèse-personne. Situation c): L'indication est la même que pour la situation a) le poids reste le même. Situation d): L'indication est plus lourde que dans la situation a) car le poids de la canne repose complétement sur le pèse-personne.
		Ophélie	b) inférieure, car il s'appuye sur la canne, il enlève donc du poids. c) supérieure, car il rajoute du poids en s'appuyant sur le plafond. d) égale, car elle est identique à la situation (a) Cela ne change rien, que la personne soit sur le pèse-personne avec la canne à la main ou qu'il s'appuie avec la canne sur le pèse-personne.
		Victor	pour a, il y a le poids du gars et le poids de la canne. a>b: pour b, le poids est partagé avec le sol, la barre étant appuyée au sol. a<c: pour c, c'est plus lourd car une partie du plafond en qqsort est aussi sur la machine. a=d: pour d c'est comme pour a
B	àép	Alain	a) égale c'est la situation de référence. b) inférieur, la canne n'exerce pas de force sur le pèse-personne. c) supérieur, une force compense l'effort pour pousser le plafond. d) supérieur, la canne exerce sa force p sur le pèse-personne
		Etienne	a)>b) parce que la canne touche le sol donc ne pèse pas sur le pèse-personne. a)<c) il rajoute une force en pressant la cann sur le plafond. a)=d) les poids des cannes se retrouvent dans tous les cas sur le pèse-personne
		Pierrette	b) inférieure -> il transmet son poids sur la canne. c) inférieure -> idem que b. d) égale -> le poids est aussi sur la balance
	dny	Daniel	a)>b): l'indication sur le pèse-personne de l'image a) sera supérieure à celle de l'image b) car dans l'image b) la canne n'intervient pas sur le pèse-personne, au contraire le pèse-personne indiquera quelque chose d'inférieur par rapport au poide de l'homme, car il s'appuie sur la canne, et exerce donc pas toute la pression qu'il exerçait en temps normal. b)<c): l'indication sur le pèse-personne de l'image c) sera supérieur à celle de l'image b) car dans c) il se sert de la canne pour exercer une forte pression sur le pèse-personne. c)=d): les indications de c) et de d) sont égales, car les forces exercées sur le pèse-personne sont plus ou moins égales
		Nina	
		Yves	b) inférieur, car une partie de la force "s'appuie" sur le sol. c) en appuyant au plafond, les forces s'annulent. d) l'homme en appuyant sa canne sur le pèse-personne créer de la force en plus sur l'engin
	giu	Germaine	b) inférieure (poids déchargé sur le sol par la canne). c) supérieure (poid en plus, partie du plafond qui appui en plus par la canne). d) égale
		Ilona	(b) inférieure parce qu'il répartit son poids sur le pèse-personne et sur la canne. (c) supérieure parce qu'il augmente le poids qui le pousse vers le bas. (d) égale parce qu'il ne change pas son poids.
		Urs	b) inférieur car le poids de la canne et le poids que le type enlève en s'appuyant sur la canne sont sur le sol et non le pèse personne. c) supérieur car la force musculaire exercée par le typese répartit aussi sur le pèse personne. d) égal car le poids se transfert du type à la canne mais reste sur le pèse personne
	hmrt	Marie	b) a>b -> il s'appuie sur la canne, donc le poids de la canne ne s'appuie pas sur le pèse-personne. c) a<c -> appuyer sur le plafond l'enfonce dans le pèse-personne. d) a=b -> le poids reste sur le pèse -personne
		Henriette	b) plus léger que pour a9 parce que l'homme s'appuie sur la canne. Il transfère une partie de son poids sur la canne qui touche le sol. C) plus lourd que a). L'homme appuie sur le plafond avec la canne ce qui fait qu'il s'enfonce sur le pèse-personne. d) =. bien qu'il s'appuie sur la canne, le poids qu'il transfère dessus reste sur le pèse-personne.
		Rose	b) inférieur, il met de son sur le sol. c) supérieur, il appuye sur le plafond avec la canne, ce qui l'enfonce sur le pèse-personne. d) égal, le poids qu'il met sur la canne reste sur le pèse-personne
		Thibault	Le chariot le plus léger arrivera en premier car sa résistance à la force du lanceur est inférieure

Séq.	Groupe	Élève	Pré-questionnaire : item #5	Pré-questionnaire : item #6
A	abs	Aurélie		
		Barbara	Non ça dépend de la vitesse à laquelle on lance la balle.	la balle de tennis car pour tomber dans le sens contraire de force de gravitation c'est la boule la plus légère qui monte le plus vite.
		Sylvie	en mettant une barre pour lui faire suivre la trajectoire. Autrement non (je ne pourrais expliquer pouquoi)	la balle de tennis car elle est conçu de manière à rebondir plus facilement alors que la boule de pétanque risque de ne rebondir qu'un peu car sa masse est trop lourde et qu'elle n'est pas conçu pour rebondir
	cjl	Cassandra	oui, quand on lance la balle il faut la faire tourner sur elle-même de sorte qu'elle prenne le virage correctement	la boule de pétanque car elle est plus lourde. Elle accélère plus rapidement que la balle de tennis.
		Julianne	ça dépend si le circuit a des rebords, si il en a, la balle peut faire le virage en suivant les bords. Mais s'il n'a pas de rebords, je pense que si on lance bien la balle elle peut faire un bout de virage mais pas tout	La balle de tennis va plus vite car elle est plus légère que la balle de pétanque. Sa masse est plus petite alors elle va plus vite.
		Laurie	Oui si on fait tourner la balle sur elle-même, elle tournerait et suivrait le circuit.	La boule de pétanque car elle est plus lourde et elle accélère plus rapidement que la balle de tennis qui est plus légère.
	efx	Ernest	en lui donnant un effet latéral	La boule de pétanque car elle est plus lourde
		Xavier	en lui donnant de l'effet → appliquer du frottement dans une zone bien précise. (rotation) [dessin] annule le frottement de ce côté, car il change de face. Normal [dessin frottement perpendiculaire à la trajectoire de la balle] Effet [dessin avec frottement latéraux à la trajectoire de la balle]	celle de pétanque, car le poids+g sera plus grande que celle de tennis. Le frottement quand à lui peut-être oublier (pas d'importance).
		Ferdinand	(La boule de pétanque atteindra le sol avant car elle est plus lourde.) Si la forme est identique le frottement est le même et la forme d'attraction aussi => elles arrivent en même temps	Je pense qu'elles mettent le même temps : La balle de tennis est plus légère, elle ira moins vite, moins loin, mais elle reviendra d'une distance plus courte. La boule de pétanque est plus lourde, va plus vite, plus loin, mais elle doit faire plus de temps pour revenir. Donc je pense qu'elles mettent le même temps.
	äov	Annette	Oui, on peut, tout dépend de la manière dont on a lancé la balle, du mouvement que la main et le bras lui impriment.	La boule de pétanque exécutera un aller-retour plus rapide que la balle de tennis qui est plus légère.
		Ophélie	Oui, on peut! Par exemple, au Tennis, on peut très bien donner un effeet à la balle pour que celle-ci prenne une courbe! On peut slicer la balle par exemple.	Ce sera la boule de pétanque. Car elle a une masse plus importante, elle sera donc en mouvement plus longtemps.
		Victor	on va frapper en tournant la balle sur la surface bleue [dessinée par l'élève sur la surface gauche de la balle] de ce fait elle aura un effet enroulé (comme une frappe sur un coup-franc au football)	La boule plus lourde ira + vite car le force de frottement est moins forte(ou plutôt la boule lourde résiste mieux) sur la boule lourde
B	àép	Alain	En la faisant rouler de manière à ce qu'un force la pousse de ce côté	La plus légère, car elle reste moins longtemps au point mort
		Etienne	on lui donne une force d'une certaine intensité et une direction précise. On peut y arriver	la balle de tennis
		Pierrette	Elles tomberont en même temps si on néglige le frottement de l'air, car la force de pseanteur (g) s'exerce sur les deux objets de manière identique. Le poids de l'objet ne change rien. La boule de pétanque tombera la première si on considère le frottement de l'air, car ce dernier va plus ralentir la balle de tennis à caus de son plus petit poids	Même cas que le premier exercice. Si on néglige le frottement de l'air, les deux objets feront un aller-retour en même temps. Par contre, si on prend en compte le frottement de l'air, la balle de tennis sera plus lente, car elle est plus légère et sera freinée par le frottement
	dny	Daniel	Non, car il faudrait la lancer d'une façon bien précise. Et ça me semble impossible	La boule de pétanque car elle exerce une force plus gande sur la corde
		Nina		
		Yves	Oui, car avant de la lancer nous pouvons faire un mouvement qui permet à la balle de dévier de la trajectoire [dessin]	_
	giu	Germaine	Oui en prenant en compte les forces extérieures (frottement, air, ...) et en lançant avec la force adéquate.	Même chose: balle de tennis arrive après boule de pétanque en bas mais remonte plus vite car g est moins important pour elle. (boule de pétanque avant) éventuellement ca g plus important
		Ilona	Oui, il faut la lancer avec un certain mouvement de rotation	La boule de pétanque. Sa masse lui donne une plus grande accélération
		Urs	Il faut faire une petit mur qui dévie la balle	Elles mettent le même car la force qui fait accélérer les masses est la même (g)
	hmrt	Marie	Non, parce quand on lance un truc ça va en ligne droite.	La boule de pétanque parce qu'elle est plus attirée vers le sol vu qu'elle est plus lourde.
		Henriette	Non. Car la direction qu'on lui donne au début est horizontale et on ne peut pas subitement luir faire changer de direction rien qu'en la lançant. Un tir vrillé ferait un arc de cercle. Mais là ce qu'on lui demande c'est de suivre un moment une trajectoire horizontale et de ne changer qu'après.	La boule de pétanque. Elle est plus lourde et est donc "attirée plus rapidement par le sol", elle gagnera plus de vitesse. 1) dans cette zone [première moitié de la période] elle gagne de la vitesse, dans la zone 2) [seconde moitié] elle utilise la vitesse acquise dans 1) pour aller le plus loin possible. La boule de tennis aura gagné moins de vitesse et ira moins haut que celle de pétanque, en plus elle fera le mouvement plus lentement
		Rose	Non, car quand on lance une balle son trajet est en ligne droite	la boule de pétanque car vu qu'elle est plus attirée vers le sol à cause de sa masse, elle atteindra plus rapidement le point vertical et au moment où elle a passé ce point elle est de nouveau attirée vers le sol
		Thibault	Oui. On peut donner une courbe à la trajectoire de la balle en lui donnant de l'effet	La balle de tennis va faire un trajet plus court que la boule de pétanque qui prend plus d'accélération

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 1A »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 1B »
A	abs	Aurélie	La bille immobile gicle sur la gauche et la bille partant du haut d'une pente après avoir percuté la bille immobile part aussi sur la gauche mais avec une plus grande vitessse.	1er phase
		Barbara		
		Sylvie	Quand la bille numéro1 touche la bille 2, la bille 2 part très rapidement dans le même sens que la bille 1, ex la bille 1 continue à rouler mais bcp moins vite.	_
	cjl	Cassandra	la bille no1 partant de la pente vient percuter la bille no2 et lui donne une impulsion qui la fait rouler à la même vitesse. Au moment du choc la bille no1 s'arrête une fraction de seconde puis continue à rouler.	Phase 1: la bille 1 roule en direction de la bille 2. Phase 2: en percutant la bille 2 cette dernière se met à rouler et la bille 1 s'arrête. Phase 3: la bille 2 roule et la bille 1 continue à rouler.
		Julianne	La bille no1 fonce dans la bille no2 et lui donne l'impulsion qui l'a fait rouler à la même vitesse. Au moment du choc, la bille no1 s'arrête une fraction de seconde puis continue de rouler.	Phase no1: la bille no1 roule en direction de la bille no2. Phase no2: en percutant la bille no2 cette dernière se met à rouler et la bille no1 s'arrête. Phase no3: la bille no2 roule et la bille no1 continue à rouler
		Laurie	La bille no1 vient percuter la bille no1 et lui donne une impulsion qui la fait rouler à la même vitesse. Au moment du choc la bille no1 s'arrête une fraction de seconde puis accélère	Phase 1:La bille no1 roule en direction de la bille no2. Phase 2: En percutant la bille no2, la bille no1 s'arrête et la bille no2 continue le même chemin et à la même vitesse que la bille no1. Phase 3: La bille no1 s'accélère gentillement.
	efx	Ernest	La bille no1 perd de sa vitesse mais continue cependant de rouler. La bille no2 part avec la vitesse initiale de la bille no1	Phase 1: phase de départ où on lâche la bille. Phase 2: phase de choc. Phase 3: phase d'après-choc où les billes continue gaiement leur voyage dans ce monde cruel à vitesse différente.
		Xavier		
		Ferdinand	La bille no1 perd de sa vitesse mais continue cependant de rouler. La bille no2 part avec la vitesse initiale de la bille no1	Phase 1: phase de départ où on lâche la bille. Phase 2: phase de choc. Phase 3: phase d'après-choc où les billes continue gaiement leur voyage dans ce monde cruel à vitesse différente.
	äov	Annette		
		Ophélie	La bille lancée (m1) heurtera m2 qui heurteras m3. On pourra dès lors observer une dénivellation de vitesses, comme ceci Vm3>Vm2>Vm1. Dans certains cas m1 s'immobilise sa vitesse étant parfois très proche de 0 dû également à l'inconstance du rail. m1=m2=m3.	1e phase: m1 est lancée m2 et m3 immobiles 2e phase: m1 heurte les autres très très bref moment d'immobilité 3e phase: Vm1<Vm2>Vm3
		Victor	La bille lancée (m1) heurtera m2 qui heurteras m3. On pourra dès lors observer une dénivellation de vitesses, comme ceci Vm3>Vm2>Vm1. Dans certains cas m1 s'immobilise sa vitesse étant parfois très proche de 0 dû également à l'inconstance du rail. m1=m2=m3.	1e phase: m1 est lancée m2 et m3 immobiles 2e phase: m1 heurte les autres très très bref moment d'immobilité 3e phase: Vm1<Vm2>Vm3
B	àép	Alain	La bille no1 va percuter la bille no2 et s'arrêter une fraction de seconde pour repartir avec une plus faible vitesse. La bille no2 prend la vitesse que la bille no1 avait avant de percuter.	P1: augmentation de la vitesse de la bille No1 sur le plan incliné P2: collision et départ immédiat de la bille No2 P3: départ de la bille No1 à vitesse plus lente et la bille No2 continue à plus garnde vitesse.
		Etienne	La bille no1 va percuter la bille no2 et s'arrêter une fraction de seconde pour repartir avec une plus faible vitesse. La bille no2 prend la vitesse que la bille no1 avait avant de percuter.	P1: augmentation de la vitesse de la bille No1 sur le plan incliné P2: collision et départ immédiat de la bille No2 P3: départ de la bille No1 à vitesse plus lente et la bille No2 continue à plus garnde vitesse.
		Pierrette	La bille no1 va percuter la bille no2 et s'arrêter une fraction de seconde pour repartir avec une plus faible vitesse. La bille no2 prend la vitesse que la bille no1 avait avant de percuter.	P1: augmentation de la vitesse de la bille No1 sur le plan incliné P2: collision et départ immédiat de la bille No2 P3: départ de la bille No1 à vitesse plus lente et la bille No2 continue à plus garnde vitesse.
	dny	Daniel	Lors de l'impact avec la bille no2, la no1 transmet toute sa force à la no2, la no1 devrait s'arrêter, mais au lieu de ça, elle perd de la vitesse au fur et à mesure et s'arrête enfin, sans doute à cause de la surface.	1: Accélération de la bille 2: Progression de la bille sur le plan à vitesse constante 3: Impact avec la bille no2, puis départ de la no2.
		Nina	Lors de l'impact avec la bille no2, la no1 transmet toute sa force à la no2, la no1 devrait s'arrêter, mais au lieu de ça, elle perd de la vitesse au fur et à mesure et s'arrête enfin, sans doute à cause de la surface.	1: Accélération de la bille 2: Progression de la bille sur le plan à vitesse constante 3: Impact avec la bille no2, puis départ de la no2.
		Yves	Lors de l'impact avec la bille no2, la no1 transmet toute sa force à la no2, la no1 devrait s'arrêter, mais au lieu de ça, elle perd de la vitesse au fur et à mesure et s'arrête enfin, sans doute à cause de la surface.	1: Accélération de la bille 2: Progression de la bille sur le plan à vitesse constante 3: Impact avec la bille no2, puis départ de la no2.
	giu	Germaine	La bille no1 descend la pente et va rencontrer la bille no2. Après le choc, la bille no1 s'arrête puis repart plus lentement. La 2ème bille, après le choc, repart avec la même vitesse que celle de la bille no1 au départ.	Phase 1: la bille no1 descend la pente Phase 2: les deux billes se rencontrent Phase 3: les deux bille roulent dans le même sens, mais la bille no1 va plus lentement.
		Ilona	La bille no1 descend la pente et va rencontrer la bille no2. Après le choc, la bille no1 s'arrête puis repart plus lentement. La 2ème bille, après le choc, repart avec la même vitesse que celle de la bille no1 au départ.	Phase 1: la bille no1 descend la pente Phase 2: les deux billes se rencontrent Phase 3: les deux bille roulent dans le même sens, mais la bille no1 va plus lentement.
		Urs	La bille no1 descend la pente et va rencontrer la bille no2. Après le choc, la bille no1 s'arrête puis repart plus lentement. La 2ème bille, après le choc, repart avec la même vitesse que celle de la bille no1 au départ.	Phase 1: la bille no1 descend la pente Phase 2: les deux billes se rencontrent Phase 3: les deux bille roulent dans le même sens, mais la bille no1 va plus lentement.
	hmrt	Marie	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.
		Henriette	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.
		Rose	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.
		Thibault	Nous lâchons une bille sur un plan incliné. Elle accèlere et en arrivant sur le plan horizontal elle percute la deuxième bille. La première ralentit et la deuxième se voit propulsée en avant.	Phase 1 : La bille accélère sur le plan incliné, en partant d'une vitesse nulle. Phase II: La bille continue un moment sur le plan horizontal et percute la 2ème bille. Phase III: La bille 1 décélère et la bille 2 accélère.

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 1C »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2A » – hauteur de la bille sur la pente
A	abs	Aurélie	Nous avons choisi ces 3 phases car elles nous semblaient le mieux décrire le mouvement des billes.	Plus la hauteur augmente, plus la vitesse augmente.
		Barbara		
		Sylvie	Nous avons choisi ces 3 phases car elles nous semblaient le mieux décrire le mouvement des billes.	Plus la hauteur de la bille augmente, plus la vitesse de la bille augmente.
	cjl	Cassandra	_	Plus la bille est haute plus elle ira vite.
		Julianne	_	Plus la bille est placée haute, plus la vitesse est élevée.
		Laurie	_	
	efx	Ernest	1 parce que c'est les seules 3 phases où les vitesses appliquées sont différentes. 2 C'est les seules phases utiles.	Plus la bille part haut sur la pente, plus sa vitesse augmente.
		Xavier		
		Ferdinand	1 parce que c'est les seules 3 phases où les vitesses appliquées sont différentes. 2 C'est les seules phases utiles.	Plus la bille part haut sur la pente, plus sa vitesse augmente.
	äov	Annette		
		Ophélie		Plus la bille part de haut, plus la bille va vite.
		Victor		
B	àép	Alain	Entre P1 et P2, la bille No1 a une vitsse constante sur le plan horizontal. Cette phase ne nous paraissait pas particulièrement importante.	100/10
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	Il y a une deuxième phase 3: Après l'impact la vitesse de la bille no1 est transmise à la no2 et la no1 devrait normalement s'arrêter, ce n'est pas le cas, peut être à cause de la surface du plan.	Sur la pente la bille n°1 accélère et sur le plat elle garde une vitesse constante.
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	Cette phase est située entre la phase 1 et 2, au moment où la bille passe sur le plan horizontal.	Plus la hauteur est élevée, plus l'accélération est grande.
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	La phase que nous avons négligée est la phase de choc. Nous l'avons englobée dans la seconde phase mais nous aurions dû dessiner l'expérience en 4 phases car la phase de choc est aussi importante.	Plus on place la bille haute, plus la vitesse est grande.
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2A » – inclinaison de la pente	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2A » – masse
A	abs	Aurélie	Plus l'inclinaison est grande, plus la vitesse augmente.	La masse n'influence pas la vitesse.
		Barbara		
		Sylvie	Plus l'angle est grand, plus la vitesse de la bille est grande.	La masse n'influence pas la vitesse.
	cjl	Cassandra	Plus la pente est inclinée, plus la bille va vite.	Si la bille 1 a une masse plus grande que la bille 2 elle continue de rouler mais si elle a une masse plus petite elle repart en sens contraire.
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	Plus l'angle est grand, plus la bille ira vite.	Le poids de la bille ne change rien à sa vitesse.
		Xavier		
		Ferdinand	Plus l'angle est grand, plus la bille ira vite.	Le poids de la bille ne change rien à sa vitesse.
	äov	Annette		
		Ophélie	Plus la pente est inclinée, plus la vitesse est grande.	
		Victor		
B	àép	Alain	30/20	20/40/10
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	L'accélération grandit au fur et à mesure que l'on incline la pente.	La vitesse est la même.
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	Plus l'angle est grand, plus l'accélération est petite (on garde la même hauteur).	Aucune influence.
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	Plus l'angle est grand, plus la vitesse est grande.	
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2A » – nombre de billes	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2A » – frottement du sol
A	abs	Aurélie	_	Le frottement du sol n'a pas de réel influence.
		Barbara		
		Sylvie	_	Le frottement n'a pas d'influence. La vitesse d'un moment au sol et un autre plus loin est égal.
	cjl	Cassandra	Elle s'arrête quand elle percute les autres billes et sa vitesse passe à travers toutes les billes.	Plus il y a de frottements, plus la bille va lentement.
		Julianne	La bille s'arrête après le choc.	Plus le frottement est grand, plus la bille va lentement.
		Laurie	La bille n°1 s'arrête lorsqu'elle percute les autres billes.	Plus le gratttement est grand + la bille 1 va lentement.
	efx	Ernest	Cela ne change rien.	Plus il y a de force de frottement plus la bille est lente.
		Xavier		
		Ferdinand	Cela ne change rien.	Plus il y a de force de frottement plus la bille est lente.
	äov	Annette		
		Ophélie		Masse augmente vitesse augmente.
		Victor		
B	àép	Alain		0/0,5
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel		Si le frottement du sol est trop grand, la bille n'avance pas.
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine		Plus le frottement est grand, plus l'accélération et la vitesse sont faibles.
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		Ca change rien
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2B » – hauteur de la bille sur la pente	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2B » – inclinaison de la pente
A	abs	Aurélie	Plus la hauteur est élevée plus la bille 1 sera propulsée violemment.	Plus la pente est grande plus la bille 3 propulse violemment la bille 1.
		Barbara		
		Sylvie	Plus on lance la bille de haut plus la vitesse de la bille après percution augmente.	Plus l'angle est grand, plus la vitesse de la bille2 après percution augmente.
	cjl	Cassandra	Elle prend la vitesse de la bille n°1 et arrive à la même hauteur que la bille 1.	Elle prend la vitesse de la bille n°1 et arrive à la même hauteur que la bille 1.
		Julianne	La bille 2 prend de la vitesse de la bille 1 et arrive à la même hauteur que la bille 1.	La bille 2 prend de la vitesse de la bille 1 et arrive à la même hauteur que la bille 1.
		Laurie	Elle prend la vitesse de la bille n°1.	Elle prend la vitesse de la bille n°1.
	efx	Ernest	Plus la bille est haute sur la pente, plus elle ira vite.	Plus l'angle est grand, plus elle partira vite.
		Xavier		
		Ferdinand	Plus la bille est haute sur la pente, plus elle ira vite.	Plus l'angle est grand, plus elle partira vite.
	äov	Annette		
		Ophélie	Plus le frottement du sol (?) est fort, moins la bille ira vite.	Plus la pente est haute, moins la bille ira loin.
		Victor		
B	àép	Alain	b1 donne sa vitesse à b2 et attend qu'elle revienne la percuter. Elles perdent de la vitesse sur les plans inclinés/ne change rien sauf que les vitesses sont plus petites.	b1 donne sa vitesse à b2 et attend qu'elle revienne la percuter. Elles perdent de la vitesse sur les plans inclinés/ne change rien sauf que les vitesses sont plus petites.
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	La vitesse (force) est transmise à la bille n°2.	La vitesse intiale est plus grande → bille n°2
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	–	–
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	La vitesse maximale de la bille 2 correspond à la vitesse maximale de la bille 1 avant la collision.	La vitesse maximale de la bille 2 correspond à la vitesse maximale de la bille 1 avant la collision.
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2B » – masse	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2B » – nombre de billes
A	abs	Aurélie	M1 repousse M3 et rebondit en arrière. M3 repart moins vite que si il avait la même masse que M1.	_
		Barbara		
		Sylvie	m2 plus lourd m3 repoussem1 dans l'autre sens et m3 est repousser moins vite que si les 2m étaient de la même masse/ m1 est plus lourd après percution m1 avance encore un petit peu et m3 avance de même manière que si il avait la même masse.	_
	cjl	Cassandra	La bille 2 part avec une vitesse plus élevée que celle de la bille 1.	La dernière bille est projetée par la vitesse de la bille 1.
		Julianne		La bille 1 s'arrête quand elle percute les autres billes et la dernière bille de la colonne part avec la vitesse reçue de la bille 1.
		Laurie		Les autres billes transmettent la vitesse de la bille n°1 à la dernière bille.
	efx	Ernest	Plus la bille est légère, plus elle ira lentement. Et vis-versa.	Cela ne change rien.
		Xavier		
		Ferdinand	Plus la bille est légère, plus elle ira lentement. Et vis-versa.	Cela ne change rien.
	äov	Annette		
		Ophélie	Plus la pente est inclinée, moins la bille ira loin.	Plus la masse est grande, moins la bille ira loin après la collision.
		Victor		
B	àép	Alain	Les vitesses diminuent beaucoup plus vite.	La bille la + lourde envoie la b2 + loin et ne s'arrête pas après la collision/La b1 repart en arrière après la collision et envoie la b2 moins rapidement.
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	La bille n°2 aura de la peine et dans certain cas elle ne pourra pas remonter la pente droite.	La bille n°1 ne s'arrête pas.
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	_	_
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	Le frottement l'empêche de prendre autant de vitesse que sans frottement→les billes perdent peu à peu leur vitesse.	Plus la masse de la bille 1 est supérieure à celle de la 2, plus la vitesse de la 2 sera grande. Et inversément.
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2B » – frottement du sol	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2C » – « M1=M2 »
A	abs	Aurélie	Pas de frottements	La bille 3 s'arrête et donne sa vitesse à la bille 1.
		Barbara		
		Sylvie		Elles ont la même vitesse, la bille1 passe sa vitesse à la bille 2 car la bille1 s'arrête après percution.
	cjl	Cassandra	La bille 2 prend la vitesse de la bille 1.	La bille 1 prend la vitesse de la bille 2.
		Julianne	La bille 2 repart avec la vitesse de la bille 1.	La bille n°2 prend la vitesse de la bille n°1.
		Laurie		
	efx	Ernest	Plus il y a de force de frottement, plus la bille est lente.	La vitesse de la bille n°2 est égale lors du choc à celle de la bille n°1.
		Xavier		
		Ferdinand	Plus il y a de force de frottement, plus la bille est lente.	La vitesse de la bille n°2 est égale lors du choc à celle de la bille n°1.
	äov	Annette		
		Ophélie		Plus la masse est grand, moins la bille ira loin après la collision.
		Victor		
B	àép	Alain	Ca n'a pas d'influence, la b3 ne bouge pas et transmet les vitesses	b1 va transmettre sa vitesse à b3 et b1 va s'arrêter → V1 = V2
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	La vitesse initiale est plus petite.	_
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	_	_
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	Ca change pas grand-chose.	la même vitesse
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move* : « activité 2C » – « M1>M2 »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move* : « activité 2C » – séquence A : « M2<M1 » – séquence B : « M1<M2 »
A	abs	Aurélie	Elles se repoussent.	_
		Barbara		
		Sylvie	_	_
	cjl	Cassandra	La bille 2 part plus vite que la bille 1 et la bille 1 ralentit après le choc.	La bille 1 revient en sens contrsire plus lentement et la bille 2 part plus lentement que la Vi de la bille 1.
		Julianne	La bille 2 part plus vite que la bille 1, la bille 1 ralentit.	La bille n°1 repart en sens contraire la bille 2 part plus lentement que la v de la bille 1.M1<M2'
		Laurie	La bille n°2 va plus vite que la bille n°1//la bille n°1 ralentit.	La bille n°1 revient en sens inverse plus lentement et la bille n°2 part + lentement que la V initiale de la bille n°1.
	efx	Ernest	La vitesse de bille n°2 est plus élevée que celle de bille n°1.	La vit. de B2 est plus faible que celle de B1.
		Xavier		
		Ferdinand	La vitesse de bille n°2 est plus élevée que celle de bille n°1.	La vit. de B2 est plus faible que celle de B1.
	äov	Annette		
		Ophélie	Vm1=Vm2	Vm1<Vm2
		Victor		
B	àép	Alain	b1 va transmettre quelque chose à b3 et b1 va continuer son mouvement.	b1 va transmettre quelque chose à b3 et b1 ve revenir en arrière.
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	_	_
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	_	_
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	La vitesse de la bille N°2 est supérieure à celle de la N°1.	La vitesse de la bille N°2 est inférieure à celle de la bille N°1.
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 2D »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 3A »
A	abs	Aurélie	a)MV b)PO 32,16 c)W1V1 +W2V2 80x13.37 + 33X41.9	[phase 1] : v_1 [phase 2] : v_1 [phase 3] : pas de vitesse
		Barbara		
		Sylvie	a)Avant choc 80x32 b)13.37x80+41.9x33 regarder si égale	
	cjl	Cassandra	_	[phase 3] : $M_1<M_2$
		Julianne	_	
		Laurie	_	
	efx	Ernest	_	
		Xavier		
		Ferdinand	_	
	äov	Annette		
		Ophélie	Vm1>Vm2	[phase 1] : v [phase 2] : v [phase 3] : $M_1<M_2$
		Victor		
B	àép	Alain	a)V2/V1=m1/m2 b)P=mV c)P1=P2 m1V1=m2V2 d) Avant le choc: m1>m2 → m1V1=m1V1'm2V2' e) Après le choc: m1<m2: m1V1=m1V1'+m2V2'	[phase 1] : m_1 v_0 a [phase 2] : m_1 v_1 [phase 3] : m_1
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	_	[phase 1] : F_1 [phase 2] : [phase 3] : m_1 v=0
		Nina	_	
		Yves	_	
	giu	Germaine	a)P=mV b)P1=P2 c)m1V1=m2V2 d)V2/V2=M2/M2=1 e)m1>m2→m1V1=m1V1'+m2V2' f)m1<m2 m1V1=-m1V1'+m2V2' g)m1V1+m2V2=m1V1'+m2V2'	[phase 1] : m_1 v_0 [phase 2] : m_1 v_1 [phase 3] : m_1
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	a) P1=P2 b) m1V1=m2V2 c) P=mV d) V2/v1=1 e) V1=V2 f) m1=m2g m1/m2 = V2/V1 + dessin	[phase 1] : v_0 [phase 2] : v_1 [phase 3, sur la 2ème bille] : v_2
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 3B »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 3C » – acceleration
A	abs	Aurélie Barbara Sylvie	accélère constante ne bouge plus (M1=M2) mais accélération si M1>M2 accélération dans sens inverse si M2>M1	–
	cjl	Cassandra Julianne Laurie	non elle accélère oui non elle décélère	–
	efx	Ernest Xavier	accélération vitesse constante accélération	vitesse
		Ferdinand	non elle accélère oui non elle décélère	–
	äov	Annette		
		Ophélie Victor	$M_1<M_2$	accélération vitesse constante accélération
B	àép	Alain Etienne Pierrette	non elle accélère oui nulle	accélération avec frottement
	dny	Daniel Nina Yves	non elle accélère oui nulle	vitesse
	giu	Germaine Ilona Urs	accélération oui si la force de frottement vaut 0 arrêt	accélération avec frottement
	hmrt	Marie Henriette Rose Thibault	non elle accélère oui non elle décélère s'arrête directement	accélération avec frottement

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 3C » – commentaires	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5A »
A	abs	Aurélie	accélération décélération après le choc même masse v=0 M1>M2 v=0 M2>M1 v=0	v1=0 v2=40m/s
		Barbara		
		Sylvie		
	cjl	Cassandra	a ->\ndécélération\n-	
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	_	dessin bille 1: 0m/s billes: 40m/s
		Xavier	_	
		Ferdinand	a ->\ndécélération\n-	
	äov	Annette		vitesse
		Ophélie	vitesse	
		Victor		
B	àép	Alain	_ décélération vitesse nulle	
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	a a=0 a=0 v=0	
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine		
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5B »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5C »
A	abs	Aurélie	v2=40m/s + 20 m/s = 60m/s	a)Fg=9,81m/s² b)P+S+F=ma c) P=mg=392,4N d)392,4N=40a e)α=20° f)a=3,35m/s² g)Px=ma=mgsinα h)Pxsinα~=134,21N i)s'en fou de S pas sur l'axe des X dessin
		Barbara		
		Sylvie		
	cjl	Cassandra		
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	vitesse bille n°2 après choc ~= environ 60m/s	F = (9,8x40) = 392N (=P) dessin → Px sin (30°) x 392) =196 → Px = 196N a= 4,9m/s²
		Xavier		
		Ferdinand		
	äov	Annette	Vb1=0 Vb2=40	Vb1=20 Vb2=50
		Ophélie		
		Victor		
B	àép	Alain		
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel		
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine		
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5D » – partie 1	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5D » – partie 2
A	abs	Aurélie	-F=ma a=-1,98m/s² '-F=2x1,98=3,96N	-F=50x1,98=99N
		Barbara		
		Sylvie		
	cjl	Cassandra		
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	a=-1,98 → gravité ? → horizontale } 3,96N	F=ma F+g+s = 50x (-1,98) = 99N
		Xavier		
		Ferdinand		
	äov	Annette	P=40x9,81=392 Px=sin (30) P=sin(30)x392=196N a=4,9m/s²	F=ma F=2x1,96=3,92N 50x1,96=98N
		Ophélie		
		Victor		
B	àép	Alain		
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel		
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine		
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5E »	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5F »
A	abs	Aurélie	9,81m/s²=une accélération terrestre	m/s²xKg=N accélérationxmasse=Force
		Barbara		
		Sylvie		
	cjl	Cassandra		
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	accélération	la masse → F=ma
		Xavier		
		Ferdinand		
	äov	Annette	accélération	masse
		Ophélie		
		Victor		
B	àép	Alain		
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel		
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine		
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5G » – partie 2	Exercices avec le logiciel *Marbles Move*: « activité 5G » – partie 3
A	abs	Aurélie	On peut négliger les forces de frottement, de soutien, de traction.	Cette analyse est pertinente quand on ne calcule que par rapport à l'axe des X donc Px et qu'on néglige F force de frottement.
		Barbara		
		Sylvie		
	cjl	Cassandra		
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	g,a	Dans le cas on peut calculer la vitesse finale sans utiliser les forces.
		Xavier		
		Ferdinand		
	äov	Annette	g et a	aucun cas
		Ophélie		
		Victor		
B	àép	Alain		
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel		
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine		
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Post-questionnaire : item #7	Post-questionnaire : item #8
A	abs	Aurélie	en même temps. P	B) égale C) supérieure
		Barbara	en même temps, car les forces de frottement sont négligées.	toutes les situations sont égales
		Sylvie	S'il n'y a pas de frottement, la plume et la boule de pétanque tomberont en même temps. S'il y a frottement, la plume tombera en même temps	b) supérieur c) inférieur
	cjl	Cassandra	les deux vont tomber en même temps, car il n'y a pas de frottement	A<B A>C
		Julianne	La plume et la boule de pétanque toucheront le sol en même temps, parce que la force, la force de gravité, qui les attirent est la même pour les deux.	A est supérieur à B, et A est inférieur à C. Car quand l'ascenseur monte, il y a une force plus petite qui est exercée sur le pèse-personne. Quand l'ascenseur descend c'est le contraire.
		Laurie	sans force de frottement elles arriveront en même temps	A<B A>C
	efx	Ernest		
		Xavier	la balle de pétanque arrivera en premier car la surface où est exercée la force de frottement est moins importante que sur la plume. G est une constante sur la terre, donc c'est la force de	B) égale (le mouvement n'a rien à voir avec la force P=poids / a≠Force). C) Je pense que le poids sur le pèse-personne sera supérieur car: P=mq -> q augmente surement
		Ferdinand	La boule de pétanque arrivera en premier sur le sol. La plume mettre plus de temps parce qu'elle a une force de frottement plus grande.	A<B parce que lorsque l'on prend de l'altitude, l'attraction est plus forte. A>C parce que l'inverse
	äov	Annette	La boule de pétanque parce qu'elle est plus lourde	B) Elle est supérieure, à cause de la poussée vers le haut. C) Elle est inférieure, à cause de la poussée vers le bas.
		Ophélie		
		Victor	a=b c>d donc le temps que met la plume pour toucher le sol est plus grand que celui de la boule de pétanque en raison d'un plus grand frottement.	B<A<C
B	àép	Alain	La boule de pétanque, car sa masse est plus importante que celle de la plume	Elle sera la même dans tous les cas. Le mouvement de l'ascenseur n'a pas d'influence sur la masse.
		Etienne	les deux tomberont en même temps parce qu'il n'y a pas de force de frottement	A<B A>C
		Pierrette	Les deux vont tomber en même temps puisqu'elles sont dans le vide et qu'il n'y a pas de force de frottement pour les freiner.	b) La force pour soulever l'ascenseur devra être plus forte que pour simplement le soutenir. La masse est plus grande, car elle est + compressée contre le bas. c) Il ne faut pas autant de force pour faire descendre l'ascenseur, la masse est + petite (les 2 forces sont dans le même sens.)
	dny	Daniel	La boule de pétanque touchera le sol en premier. Si on enlevait l'air, donc tous les frottements, les deux objets toucheraient le sol en même temps.	B) l'indication est supérieure à celle de la A) C) l'indication est inférieure à celle de la A)
		Nina	Ils arrivent en même temps	b) supérieure c) inférieur
		Yves	Si elles sont dans le vide, il n'y a pas de frottements. La plume et la boule de pétanque tomberont en même temps	La situation b est supérieure (gravité) La situation c est inférieure, car l'homme aura tendance à s'élever dans l'ascenseur
	giu	Germaine		
		Ilona	la boule de pétanque, car la plume subit un frottement plus grand	égale le poids ne change pas
		Urs	La boule le frottement de l'air n'a presque pas d'incidence sur sa chute, alors qu'il va considérablement ralentir la plume car elle est beaucoup plus légère et a une grande prise au vent. Pour les 2, g applique la même force, sans considérer le frottemetn, elles tomberaient en même temps avec a=9.81m/s2	B) supérieur car l'accélération de l'ascenseur s'ajoute à la force P. C) inférieur car l'accélération de l'ascenseur se soustrait à la Force P
	hmrt	Marie		
		Henriette	Elles arriveront les deux en même temps. Parce que dans le vide il n'y a pas de frottement	A<B A>C a) N=P b) Avec la traction de l'ascenceur, le soutient s'additione à la traction pour donner le poids (de signe inverse) T+N=P P>N. c) T-N=P P<N
		Rose	En même temps, car dans le vide il n'y a pas de frottement, alors on ne tient pas en compte le poids	b) La masse est supérieur au B, car la force de la masse et celle de l'ascenseur s'aditionnent. C) La masse est inférieur au C, car les deux forces ont des vecteurs opposés alors on les soustrait.
		Thibault	Les deux objets toucheront le sol en même temps.	B>A>C

Séq.	Groupe	Élève	Post-questionnaire : item #9	Post-questionnaire : item #10
A	abs	Aurélie	force normale	comme au bob le plus lourd va plus vite → lié à la masse
		Barbara	propulsion	le plus lourd, car il y aura moins de force de frottement.
		Sylvie	force de vitesse	le chariot le plus lourd
	cjl	Cassandra	réponse attendue	le chariot le plus lourd arrive en premier à cause de la force de traction
		Julianne	propulsion	Ils arriveront les deux en même temps en bas. Car le plus lourd a une vitesse plus grande que le plus léger, mais le plus lourd a une force de frottement plus élevée que le plus léger. Donc ça revient au même.
		Laurie	réponse attendue	le plus lourd car il y a une plus grande force de traction
	efx	Ernest		
		Xavier	réponse attendue	le chariot le plus lourd. -> P a une influence sur la vitesse du chariot
		Ferdinand	force normale	C'est le chariot le plus lourd arrivera en-bas en premier
	äov	Annette	force normale	Le plus lourd, parce que son poids le fait descendre plus vite
		Ophélie		
		Victor	force d'inertie	a=mg m1<m2 q1=q2 -> a1<a2
B	àép	Alain	force normale	Le plus lourd, car son poids lui donne une plus grande accélération sur un plan incliné.
		Etienne	frottement horizontal	Le chariot le plus lourd
		Pierrette	poids	le chariot le plus lourd arrive le premier en bas à cause de la gravité à laquelle il est + sujet
	dny	Daniel	force normale	Le chariot le plus lourd arrive en premier
		Nina	_	le chariot plus léger arrivera plus vite
		Yves	résultante	Le chariot le plus léger arrive en premier; la masse du chariot varie mais la force exercée sur eux est la même.
	giu	Germaine		
		Ilona	accélération	Le plus léger car le frottement est plus faible ou le plus lourd car son poids l'attire vers le bas
		Urs	réponse attendue	Bien que l'accélération donnée par g soit la même, le frottement sur l'essieur du chariot lourd est plus importante, ? ar le chariot léger arrivera en premier.
	hmrt	Marie		
		Henriette	réponse attendue	ΣF=ma
		Rose	force d'inertie	Le plus lourd car
		Thibault	réponse attendue	Le chariot le plus lourd arrivera le premier

Séq.	Groupe	Élève	Post-questionnaire : item #11 – commentaire	Post-questionnaire : item #12
A	abs	Aurélie	il n'aura pas son centre de gravité mais subira encore une force gravitationnelle	rayon est plus petit il aura moins de distance à parcourir
		Barbara		le rayon est plus petit, donc il y aura moins de distance à parcourir
		Sylvie	car elle a subit une force qui a tourné la boule, alors quand le fil se détache elle a l'impulsion de la Force.	La boule n°2 car la longueur du fil est plus courte que le fil de la première boule de pétanque.
	cjl	Cassandra		La boule de pétanque n°2 fera un mouvement d'aller-retour en minimum de temps car il a un plus petit fil et la période varie selon la longeur du fil.
		Julianne		La boule de pétanque n°2 fera le mouvement plus vite que la boule n°1, parce que la longueur du fil est plus courte, donc elle va aller plus vite. Cela n'a rien à voir avec la masse des boules.
		Laurie		la boule de pétanque n°2. La période d'un pendule dépend de la longueur du fil et non pas de la masse
	efx	Ernest		
		Xavier	dépend de la position de la main et du mouvement du bras. Je prends un mouvement [rotatif]. On a un mouvement donné par la main (traction?). Ce mouvement donnera à la balle une trajectoire sensiblement rotative.	La deuxième car la période varie selon la largeur du fil (cf. formules)
		Ferdinand	Elle ira tout droit	La boule de pétanque n°2. On a vu que la période ne varie pas en fonction de la masse, mais de la longueur de la corde
	äov	Annette		La boule n°2
		Ophélie		
		Victor		la plus courte car la boule faisant un arc-de-cercle qui dépend du diamètre, plus le diamètre est petit (L>L/2) plus l'aller-retour est petit.
B	àép	Alain	Elle continue le mouvement, en raison de sa vitesse.	La 2, car sa longueur de fil est plus courte -> mouvement plus rapide
		Etienne		Boule n2
		Pierrette	la trajectoire est dans la même direction que la force de frottement (f)	la boule n°2 va effectuer un aller-retour + vite, car la période (T) varie en fonction de la longueur du fil et pas en fonction de la masse.
	dny	Daniel		C'est la n°2 qui fait des aller-retour le plus vite
		Nina		La boule de pétanque n°2
		Yves		La boule de pétanque n°2
	giu	Germaine		
		Ilona		la boule n°2 car sa période est plus rapide
		Urs		La boule 2 car plus L est petit, plus le temps pour un aller-retour est court
	hmrt	Marie		
		Henriette		la boule de pétanque n2. Si la longueur du fil est plus courte, la période sera plus rapide.
		Rose		le plus court car il a un parcours plus petit
		Thibault		La boule de pétanque n2

Séq.	Groupe	Élève	Graphe *Digalo* : couche 1 – item #1	Graphe *Digalo* : couche 2 – item #2
A	abs	Aurélie		
		Barbara	7 le poids ne joue aucun rôle dans la chute d'un objet (6) 15 mais la force de frottement ainsi que l'apesanteur sont égal chez les deux balles (9)	30 a>b; c>a; d>a; si c et d pousse de la même force alors c=d (23) 34 mais bien sur le plafond tombe sur le gars aha. Il sera plus lourd s'il pousse la barre vers le plafond (24) 39 d'accord (29)
		Sylvie		
	cjl	Cassandra	20 Si les deux balles tombent en même temps c'est parce qu'elles sont attirées par la même force de gravitation (6)	25 Nous sommes totalement d'accord avec cette réponse (23; 24) 29 b< que tous les autres parce qu'il n'y a pas le poids de la canne sur la balance (24)
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	6 Pourriez-vous expliciter votre réponse svp.. nous avons de la peine à comprendre!! olé! (5) 9 Dans la réalité la force de frottement joue un grand rôle (7) 10 ON T'AIME SOPHIE, ON T'AIME PLUS, DE NOUVEAU ALORS (5) 13 Si on néglige les forces de frottements les boules tomberonts en même temps. Par contre si on en tient compte et l'hauteur de la chute est suffisante, les boules vont atteindre une vitesse maximale d'environ 200km/h (9)	23 C>D, D=A, A>B 24 C> tous les autres. Cela s'explique car en plus du poids de l'homme et de la canne, il a la pression exercée par le plafond (23) 28 D=A Car il y a le poids de l'homme et de la canne dans les deux cas, et que la pression exercée par la canne sur la balance ne change absolument rien (23) 31 A>B. Car en B il n'y a pas le poids de la canne (23)
		Xavier		
		Ferdinand		
	äov	Annette	5 jOli 14 Etant donné que l'attraction terrestre est la même, les balles tomberont donc en même temps... Fuck l'argentine! ^^ (13)	27 Nous sommes tout à fait d'accord avec l'affirmation du grOupe 4 (facile, oui, Emilien)! Votre perspicacité est exceptionnelle... bravO bravO! champiOn! (23)
		Ophélie		
		Victor		
B	àép	Alain	8 Si on prend en compte le frottement, c'est la boule de pétanque qui tombera en premier. 19 chefffffff!!! (14) 25 Oui si on tient pas compte du frottement!! (10; 18) 32 PARCE QUE!!! (24; 26) 35 Face de Yaourt! (29) 42 Pour nous, b est inférieure! (?) 48 Pour nous, b est inférieure 50 On est d'accord (49)	54 on est d'accord! Sauf pour c) (39) 57 En fait on est d'accord pour c) (54) 61 PARCE QUE!!! (58) 62 ave maria (60)
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	17 On est d'accord (8) 20 bonjour 22 malgrés le fait que l'on est d'accord le frottement est trop petit pour influencer la chute des boules (8; 14) 29 Jacobins! (19; 26)	44 l'indication la plus grande sera sur le cas c) (39) 51 d'accord petite bande de marins d'eau douce [signé y] (39) 56 on recherche les moches qui nous exaspèrent et nous horripilent avec leur flèches verte totalement inutiles (39; 53) 63 pourquoi? (54) 64 ça vous dirait n'est-ce pas? vous payer combien? (59)
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	10 les deux balles touchent le sol en même temps 14 la différence de frottement est trop faible pour que l'on puisse la prendre en compte (8) 18 l'accélération causée par la gravitation sur terre vaut toujours 9,81 m/s2 (10) 24 Pourquoi le frottement serait plus faible sur la boule de pétanque??? (8) 26 anti-scientifique! (19; 29; 32) 37 et alors, la marmotte, elle met le chocolat dans le papier d'alu!!! 43 le groupe 3[dny] a tort 45 le groupe 3[dny] a tort 46 le groupe 3[dny] a toujours tort 49 pour une fois le groupe 3[dny] a raison	53 pour une fois le groupe 3 [dny] a raison (39; 44) 58 et pourquoi? (54) 60 vous êtes revenus dans le droit chemin mes fils (57)
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	34 vive la physique (14; 18) 36 celui qui lit ça est plus stupide que celui qui l'a écrit!! (19)	39 b plus léger pcq il met une partie de son poids sur le sol, c est plus lourd pcq en exerçant une force sur le plafond il s'enfonce et le d est égal au a 55 le tit mec a une sale gueule (53) 59 [y] à poil! (39)
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Graphe *Digalo* : couche 3 – item #3	Graphe *Digalo* : couche 4 – item #4
A	abs	Aurélie		
		Barbara	40 sur c il y a la force de gravitation et la force exercée par le footballeur sur la balle 42 d'accord :) (36)	44 le chariot le plus lourd ira plus vite car le poids favorise la vitesse quand il y a une force de soutien (le support) 50 je sais pas je sais juste que en bobsleigh quand une personne est plus lourd elle va plus vite si on ne tient pas compte de la technique (49)
		Sylvie		
	cjl	Cassandra	36 sur A il y a la force de gravité et de soutien 37 sur B il y a la force de gravité, de soutien et c'est tout	46 Le 2ème chariot arrive en premier car il est plus lourd (44) 52 le premier a une force de frottement plus faible mais étant donné qu'un objet plus lourd va plus vite le 2ème arrivera avant le 1er (49) 56 vous avez raison (55)
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	35 a=> aucune force mis à part la pesanteur (=> poids de la balle) (33) 38 b=> Force de pesanteur (=> poids de la balle), Force de soutien (la balle reste immobile un instant) (35) 41 c=> force de pesanteur, force de frappe (élan) et frottement (38)	47 Il y a une forcede frottement mais plus faible! Ta tann ta tann (45) 49 Mais la force de frottement alors? (44) 54 Tu le dis bien: si on ne tiens pas... Et pour le bobsleigh on est en descente (poids à l'avant). KC (50) 55 Le Bob. Est en descente donc son accélération est augmentée s'il est plus lourd (54)
		Xavier		
		Ferdinand		
	äov	Annette	33 une foisde plus d'accord avec vous groupe 4, groupe épatant. Il n'y a pas de force de ssoutien n'est-ce pas? Besoin de votre soutient dans notre affirmation! (35)	45 le plus léger car il y a peu de force de frottements 48 peut-être et puis? On entendait par la une plus faible force de frottement... (45) 51 love blacks 53 toi le lourd.... Chuuuut!
		Ophélie		
		Victor		
B	àép	Alain	79 On l'aurait trouvé tout seul... (76) 68 Dans la 1ere il y a la force de soutien et le poids (66) 69 il y a TOUJOURS la force de soutien (66)	82 on est d'accord (80; 83; 84) 86 Ben oui si le chariot est plus léger.. (83; 85) 90 Puisqu'il est plus léger, l'accélération donnée par le ressort est plus importante...
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	67 a) ps de force si on tient compte que le ballon est arrêté (si ce n'est celle de soutien exercée par le noyau de la Terre et le poids du ballon) (66) 76 Force est de constater qu'il se trouve une accélération et différentes forces	81 une personne sur 3 n'est pas d'accord, [y] en l'occurrence (80) 89 car la détente du ressort est la même par [y] (81; 87) 91 [n] et [d] sont d'accord (80)
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	71 NON!!! La force de soutien n'est la que si l'objet est posé sur qqch! (66; 68; 69) 73 ouboï (72) 74 ça n'a tellement pas de sens que tu ne mérite pas que l'on discute avec toi. (67) 75 vous cartonnez tellement que vous êtes en carton maché!!	83 le plus léger arrive en premier (80; 82) 84 car le frottement avec le sol est plus faible pour le chariot léger (82; 83) 85 de plus l'accélération donnée par le ressort sera plus faible pour le chariot lourd (83; 86) 87 [y], tu as tort (un ange te parle) (89) 92 hors sujet (88; 89)
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	66 A: poids et soutien, B: poids, soutien, force musculaire, frottement C: poids, frottement 72 GOA4EVER 77 u boji (73)	80 le chariot léger arrivera plus vite au point A car la force de frottement est inférieure 88 si on mettait un train devant le ressort il irait bien moins vite qu'un chariot en plastic (80)
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Graphe *Digalo* : couche 5 – item #5	Graphe *Digalo* : couche 6 – item #6
A	abs	Aurélie		
		Barbara	62 d'accord :) (58; 59)	73 la balle de tennis logiquement vu sa structure qui permet un rebond plus facile (72) 78 je retire (73) 81 biiiieeennn!! Vs avez compris votre TP (80)
		Sylvie		
	cjl	Cassandra	60 oui il faut la faire tourner sur elle-même 66 si on lui donne de l'effet elle tourne forcément sur elle-même (65) 70 pouvez-vous nous expliquer comment donner de l'effet à une balle sans qu'elle tourne? (68)	75 elle le font en même temps (73) 82 logique qui tue (80; 81) 84 la logique est un effet surdimentionnel qui consiste à nous prouver que la théorie n'est pas toujours juste (83) 86 la subjectivité est subjective (85)
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	59 Oui avec un effet et une faible vitesse 65 ça dépend de l'effet, pas forcément besoin de rotation (60) 68 Nan regarder Juninho ou CHIN CHIN RECOBA par exemple. Si on frappe une balle, on peut l'envoyer avec un effet mais sans rotation de la balle sur elle-même (65) 71 plat du pied! Donc la balle fait une courbe mais ne tourne pas sur elle-même (70)	76 C'est la corde qui compte (longueur). CA ne dépend pas du poids (73) 80 On trouve cela en expérimentant! (=>RAPPORT FAIT EN CLASSE) (76) 83 Mais qu'est-ce que la logique finalement? (82) 85 La surdimentionnalité est subjective (84)
		Xavier		
		Ferdinand		
	äov	Annette	58 avec un énorme effet et très très peu de vitesse 64 merci les filles (62) 69 Il n'y a pas forcément de rotation	72 lquel rapport entre la question et la structure de la balle? (73)
		Ophélie		
		Victor		
B	àép	Alain	95 Oui, parce qu'on peut lui donner de l'effet en faisant pivoter la main en lançant la balle par exemple (93) 99 Avec des si et des la on fait une jolie chanson... Tricheur!! (97) 102 va dire ça à Tiger Woods! (96)	111 Est-ce que la masse influence qqchose dans un pendule?
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	94 oui, depar le mouvement de la main. [d] pas d'accord 96 on peut pas maîtriser la trajectoire de la balle de façon assez précise pour pouvoir garantir que la balle prendra le virage (94)	104 la balle de tennis le fera plus vite 110 car il a masse plus petite donc le trajet sera plus court car elle va moins loin
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	97 on pourrait aussi faire un petit mur qui longe le circuit par l'extérieur et qui guiderait ainsi la balle 100 difficile à appliquer (93; 95; 96) 103 développe, pourquoi? (99; 101)	106 (supposition) la vitesse dépend de la longueur du fil, non de la masse 109 (supposition) la vitesse dépend de la longueur du fil et non de la masse. Donc elel iront à la même vitesse
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie	93 possible si on y ajoute de l'effet, mais improbable 98 l'effet consiste à faire tourner la balle (93) 101 hors sujet (97)	_
		Henriette		
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Rapport expérimental – item #1	Rapport expérimental – item #2
A	abs	Aurélie Barbara Sylvie	boule de gomme masse=9g balle de ping-pong masse=2g même hauteur même temps 0.50s toute les deux pétanque et ping-pong: même temps même temps parce que la masse n'influence pas la vitesse sur un plan vertical. [autre écriture:]Le poids a une influence sur la trajectoire alors que dans la situation 4, le poids n'est pas tenu en compte	
	cjl	Cassandra Julianne Laurie	Pballeargentée=80g Pballemagique=9g Pballepingpong=2g Conclusion: La balle argentée et la balle magique tombe en même temps (arrive en même temps sur le sol). La balle argentée et la balle de ping-pong arrive aussi en même temps Peu importe le poids qui diffère les balles, elles tomberont toujours en même à cause de la force de gravité qui est toujours la même.	a) 65.5kg b) 55.2kg c) 69.5kg d) 65.5kg b<a, c, d a=d c>a, b, d
	efx	Ernest Xavier	Dans un milieu normal (sans vide d'air) il y a des forces de frottements donc la balle de pétanque (la plus lourde -> elle a plus de frottement) va arriver la première. Par contre dans un milieu sans air (vide) les deux balles arriveront en même temps car les forces de frottements seront annulés.	a=d b<a=d<c -> expériences: 82.6=82.6<75<83
		Ferdinand	Nous avons une petite balle en plastique pesant 9 grammes, une bille de 80g et une 3ème balle de 1g. Nous voulons voir laquelle ou lesquelles touchera/ toucheront le sol en premier.	Situation initiale: une personne seule sur le pèse-personne debout avec la barre de fer dans les mains. Poids: ~72.7kg Situation 2: debout sur le pèse-personne, la barre appuyant le
	äov	Annette		
		Ophélie		
		Victor	Nous avons une petite balle en plastique pesant 9 grammes, une bille de 80g et une 3ème balle de 1g. Nous voulons voir laquelle ou lesquelles touchera/ toucheront le sol en premier.	Situation initiale: une personne seule sur le pèse-personne debout avec la barre de fer dans les mains. Poids: ~72.7kg Situation 2: debout sur le pèse-personne, la barre appuyant le
B	àép	Alain	b1=9g t1=0.56s, 0.64s, 0.60s => 0.6s b2=80g t2=0.62s, 0.64s => 0.63s La boule la plus lourde tombe un peu plus vite que la plus	a) debout sur la balance avec la canne à la main m=77kg b) debout sur la balance avec la canne appuyant sur le sol m=74.3kg
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel Nina Yves	Poids des billes 1) 75g 2) 8g 3)2g Les billes arrivent en même temps. Mais en réalité, elles diffèrent de quelques centièmes à cause des forces de frottements.	b) debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le sol c) debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le plafond d debout sur le pèse-personne avec la canne appuyant sur le pèse-personne a) 77.3 b) 74.2 c)82.2 d) 77.2 b) Il n'y a que P1 qui compte puisque la force P2 est exercé sur le sol c) à 74.2 on ajoute une force supplémentaire, c'est à dire celle
	giu	Germaine Ilona Urs	m1=9g m2=80g m3=2g m4=~0g temps m,is pour tomber => 0.4s L'accélération terrestre est toujours la même (9.81m/s2). La masse ne joue aucun rôle.	a) 72kg b) 46kg c) 80kg d) 72kg a et d sont identiques car le poids de l'homme et le poids de la canne sont additionnées et s'appuyent sur la balance. B est plus léger car une partie du poids de l'homme est déviée sur la canne qui s'appuye sur le sol. C est plus lourd car il y a un troisième poids, celui de la canne appuyée sur le plafond
	hmrt	Marie		
		Henriette Rose Thibault	m1: 80g t1=00"67s m2: 9g t2=~le même -> imprécision de l'œil et du chronomètre manuel. Si on ne prend pas en compte la force de frottement, les boules tomberont en même temps. Mais si on la prend en compte, on remarque que le temps de chute dépend du poids et de la forme (-> frottement) de l'objet.	c) ~90.0kg d) 81.7kg Explication: b) l'homme transfère une partie de son poids sur le sol au moyen de la barre. Le sens de la force que l'homme exerce sur le sol est opposée au sens du poids, qu'il exerce sur la balance. Donc ces deux forces se soustraient et la force exercée sur la balance diminue. c) le sens de la force de réaction du plafond est identique à celui du poids. Les deux forces s'additionnent et le poids exercé sur la balance augmente

Séq.	Groupe	Élève	Rapport expérimental – item #3	Rapport expérimental – item #4
A	abs	Aurélie	B) F: force exercée par la personne sur le ballon. C) F: force exercée par la personne sur le ballon. F: force de frottement avec l'air.	voiture vert: 24g voiture jaune: 45g même distance: vert: 0.21s jaune: plus long, environ 4s deuxième distance (la même pour les deux): v: 0.25 j: 0.47 sur un plan horizontal le poids réduit la vitesse. Quand projeté par le ressort, un poids plus léger prend plus de vitesse car il y a moins de poids donc de force de retenue.
		Barbara		
		Sylvie		
	cjl	Cassandra	N: force de soutient P. poids f: force de frottement g: force de gravité	Pturbo=45g Pverte=23g Tturbo=1.07s Tverte=0.35s Conclusion: la turbo qui est plus lourde va plus lentement que la voiture verte, parce que la force de frottement est plus grande
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	A) On trouve une force de soutien et de pesanteur (->poids). Cela explique que la balle reste sur la table. (soutient de la table et pesanteur de la balle) B) on a un soutien (force de soutien du pied respectivement) et le pois de la balle (pesaneur). Après le principe d'actionréaction, la balle sera immobile un instant (avant qu'elle parte) C) Quand la balle est en l'air plus aucun force n'agit sur elle (sauf pesanteur et frottements)	voiture jaune: poids=45g (temps 0.36s) voiture verte: poids=22g (temps 0.25) Dans le principe d'action réaction on constate sûrement une influence de la masse. Explication ΣF=ma a=ΣF/m Comme ΣF est égal dans les deux cas, plus la masse est grande, plus l'accélération sera petite.
		Xavier		
		Ferdinand	A: la balle au sol subit la force de soutien (N) et le poids. B) la balle subit N et P, comme précédemment, ainsi qu'une poussée donnée par le pied (F). C) la balle ne subit plus que son poids et la force de frottement de l'air.	–
	äov	Annette		
		Ophélie		
		Victor	A: la balle au sol subit la force de soutien (N) et le poids. B) la balle subit N et P, comme précédemment, ainsi qu'une poussée donnée par le pied (F). C) la balle ne subit plus que son poids et la force de frottement de l'air.	–
B	àép	Alain	a) N: soutien P: poids b) F: force appliquée par le pied sur la balle P: poids c) f: frottement P: poids	V1=44.8g t1=0.56s, 0.56s => 0.56s V2=22.4g t2=0.34s, 0.31s => 0.325s d=60cm La voiture la plus légère (V2) est plus rapide que la voiture la plus lourde (V1).
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel		Le chariot n°2 arrive en premier, car tandis que la masse du chariot varie, la force exercée par le ressort est le même. 22,5g en 37/100 44,7g en 75/100 m1>m2 Il faudrait une force plus grande pour arriver à la même vitesse.
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	a) N, P; P: poids N: force de soutien b) T, F, P; T: force de traction F: force de frottement c) F, P (F est très faible)	voiture lourde 44.7g 0.81s voiture légère 22.4g 0.47s la voiture plus légère va plus vite car pour un ressort de même force, il y a moins de masse à déplacer. F=ma comme la masse change, l'accélération change aussi. Plus la masse est élevée, plus l'accélération est faible.
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		
		Henriette	a) Forces: soutient, poids b) Forces: motrice, poids c) Force: poids	m1=22.3g t1=0.34s m2=44.7g t2=0.66s La voiture la plus lourde met plus de temps à parcourirla même distance, avec la même impulsion.
		Rose		
		Thibault		

Séq.	Groupe	Élève	Rapport expérimental – item #5	Rapport expérimental – item #6
A	abs	Aurélie	En l'air, il suffit de donner de l'effet à la balle. En général, trajectoire rectiligne f dû au contact avec le sol. sur plan horizontal -f=ma. Toujours rectiligne car il ont un sens opposé (f et trajectoire (accélération))	49.2cm 100g 10périodes=14.39 1période=1.44 47.8cm 20g même longueur 10périodes=14.2 1période=1.42 du haut jusqu'au centre de masse du poids = longueur. Plus grand poids, centre masse plus bas donc longueur plus grande légérement mais normalement même longueur = même période
		Barbara		
		Sylvie		
	cjl	Cassandra	Conclusion: Ce n'est pas possible de faire prendre cette direction à la balle. Qu'on la lance avec ou sans effet, la balle a une trajectoire droite. De toute manière quand la balle avance, elle tourne forcément. Donc quelque soit sa façon de tourner, elle ira tout droit.	balle de tennis: 1période=1s3 boule de pétanque: 1période=1s39 Conclusion: la masse n'a aucun effet sur la durée d'une période. Si la longueur du fil est plus courte, la durée d'une période est plus courte.
		Julianne		
		Laurie		
	efx	Ernest	Ce n'est pas possible avec un contat avec le sol, car la trajectoire (sur une longue distance) ne peut pas subir de variation (elle reste rectiligne). Dans l'air, par contre, on peut provoquer une variation d'une part à cause de l'annulation des forces de frottements (au sol). Mais surtout par "la création" d'une force de frottement avec l'air.	la période d'un pendule (vitesse) va dépendre pas du poids mais de la longueur de la corde. (cf. rapport pendule)
		Xavier		
		Ferdinand	_	_
	äov	Annette		
		Ophélie		
		Victor	_	_
B	àép	Alain	La balle a toujours une trajectoire rectiligne à cause du frottement. L'effet qu'on lui donne ne change rien!	P1=20g P2=100g L=43cm P1: 10T=12.87s, 12.48s: 12.675s -> 1T=1.27s P2: 10T=12.17s, 12.02s: 12.095s -> 1T=1.21s Le poids le plus lourd effectue un aller-retour plus vite que l'autre.
		Etienne		
		Pierrette		
	dny	Daniel	Il y a toujours un mouvement rectiligne à cause des forces de frottement. Il serait possible de dévier la trajectoire, mais en l'air (ex.: footballeur)	Il n'y a pas de dépendance liée à la masse. Ce sera donc toujours le même temps.
		Nina		
		Yves		
	giu	Germaine	Il est impossible de faire tourner la balle. Dessin des forces: frottement, soutien, poids, vitess Ici, on ne regarde pas p et s. f et v ont toujours la même direction et forment une ligne droite. Quand on donne de l'effet à une balle, on influence la vitesse mais pas la trajectoire.	Plus le fil est court, plus la période est rapide. D: 28cm masse: 20g -> période: 1.09s masse: 100g -> période: 1.12s d: 46cm masse: 100g -> période: 1.44s masse: 20g -> période: 1.43s La masse ne joue aucun rôle.
		Ilona		
		Urs		
	hmrt	Marie		
		Henriette	Quoi que l'on fasse, la trajectoire de la balle reste rectiligne. La rotation que l'on applique sur la balle ne change pas sa trajectoire.	La période d'un pendule ne dépend pas de la masse de l'objet. Si la longueur du fil et l'abscisse angulaire initiale sont les mêmes pour les deux montages, le temps qu'ils mettront pour une période sera le même. m1≠m2 l'=l α'=α T1=T2
		Rose		
		Thibault		

C.4 Graphes d'argumentation produits sur *Digalo*

Les graphes d'argumentations *Digalo* sont présentées ci-dessous en leur état à la fin de la leçon. Vu que les élèves avaient la possibilité d'effacer, modifier ou déplacer leurs contributions, cet état final de la carte ne représente pas l'ensemble des contributions ou modifications, mais celles-ci ne sont accessibles que sous format vidéo par un *replay* de la carte dans le programme *Digalo*. Dans certains cas, des contributions ont été déplacées à la périphérie, ou des contributions vides supprimées, afin d'améliorer la lisibilité dans un format A4. De telles modifications n'ont jamais fait disparaître un contenu verbal, ni n'ont affecté les relations entre les interventions (marquées par les liaisons graphiques), et dans la mesure où la lisibilité le permettait, j'ai gardé la structure des graphes d'argumentation que les élèves ont établie.

C.4.1 Groupes de la demi-classe A

- : Barbara et Sylvie
- : Cassandra, Julianne et Laurie
- : Ernest, Ferdinand et Xavier
- : Annette, Ophélie

- lien neutre entre interventions
- lien de support à une intervention
- lien d'opposition à une intervention

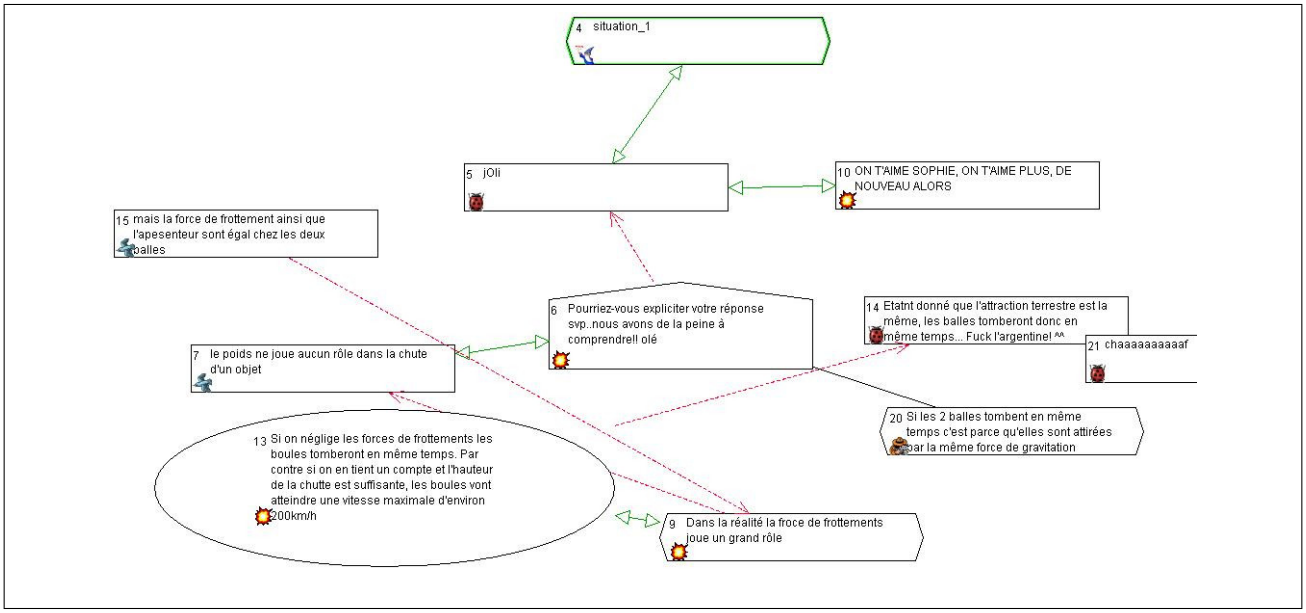


FIGURE C.3 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #1.

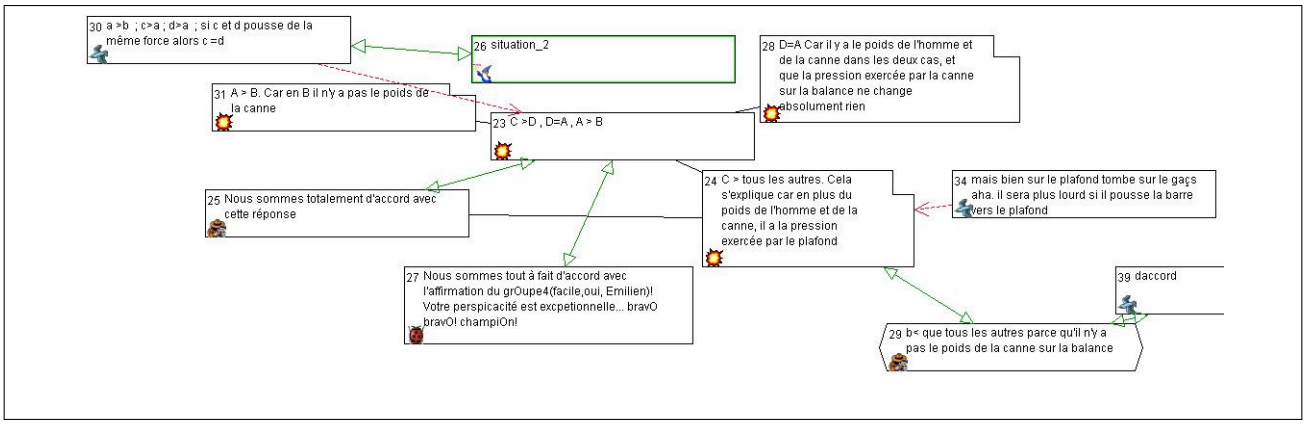


FIGURE C.4 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #2.

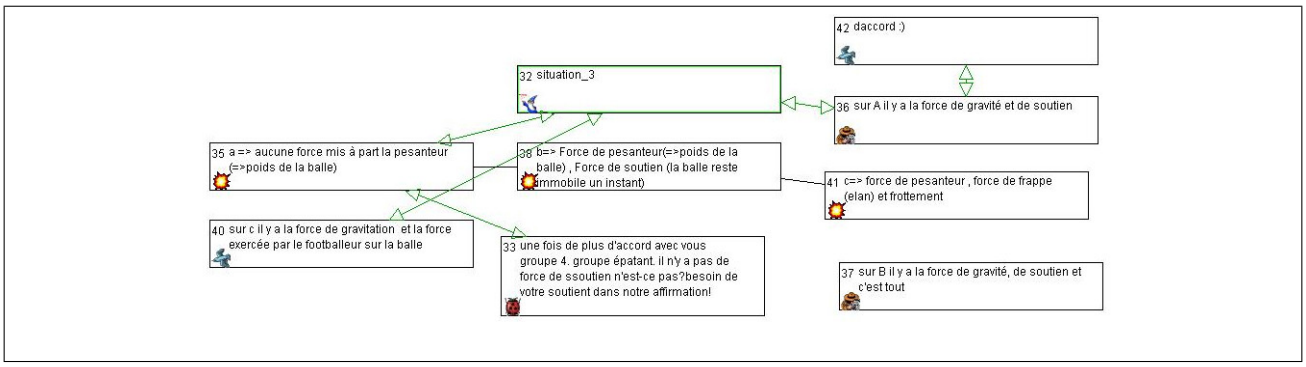


FIGURE C.5 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #3.

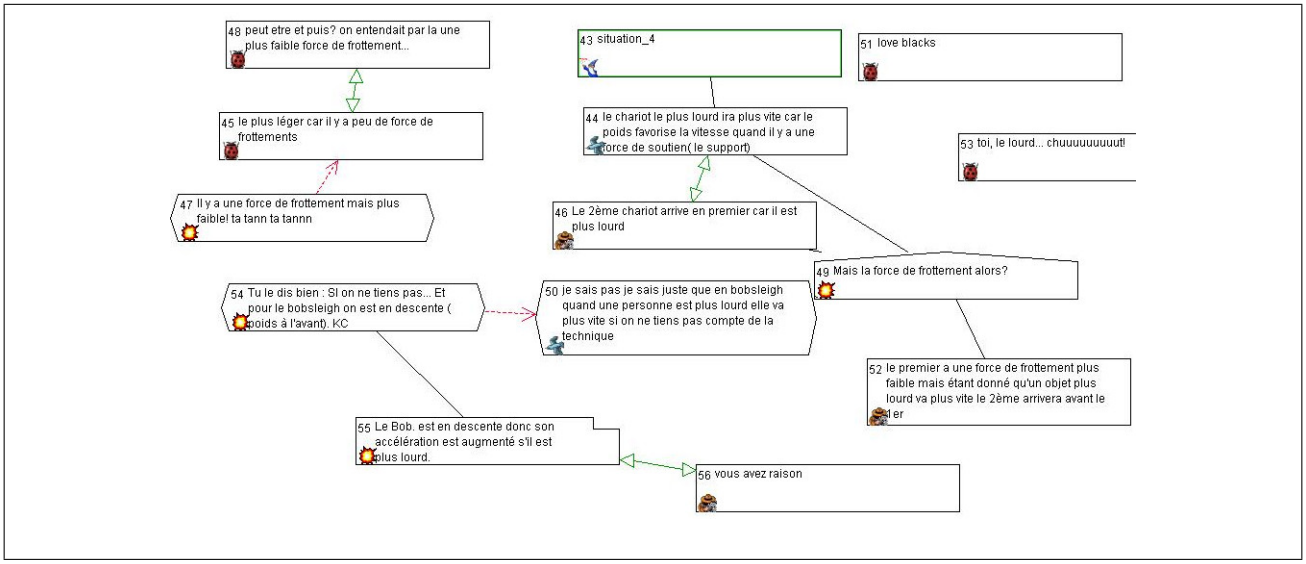


FIGURE C.6 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #4.

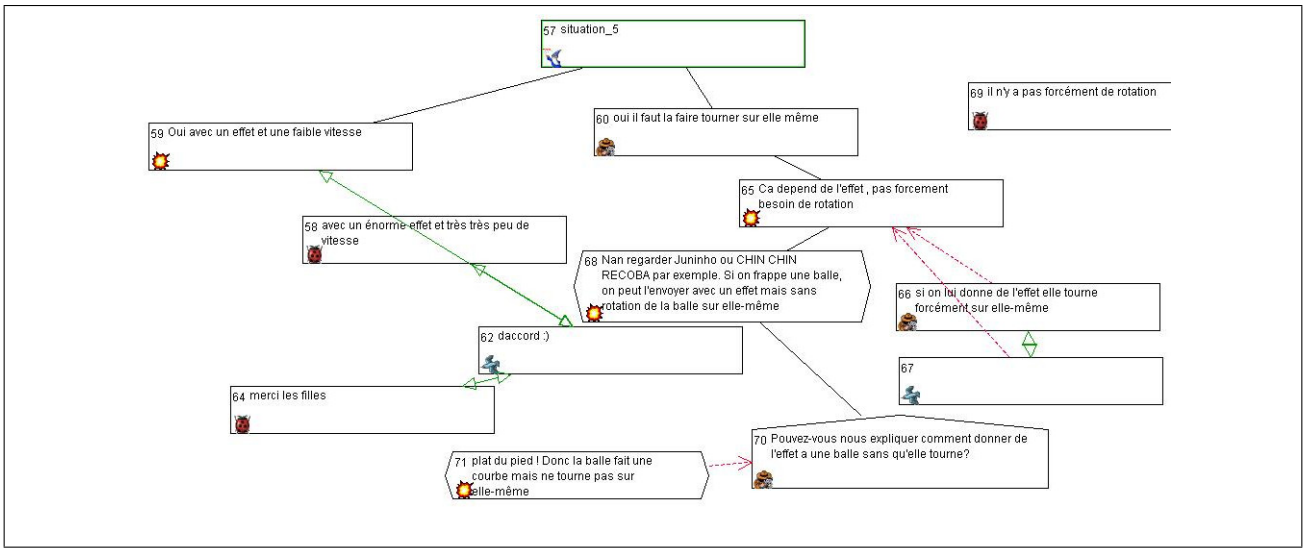


FIGURE C.7 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #5.

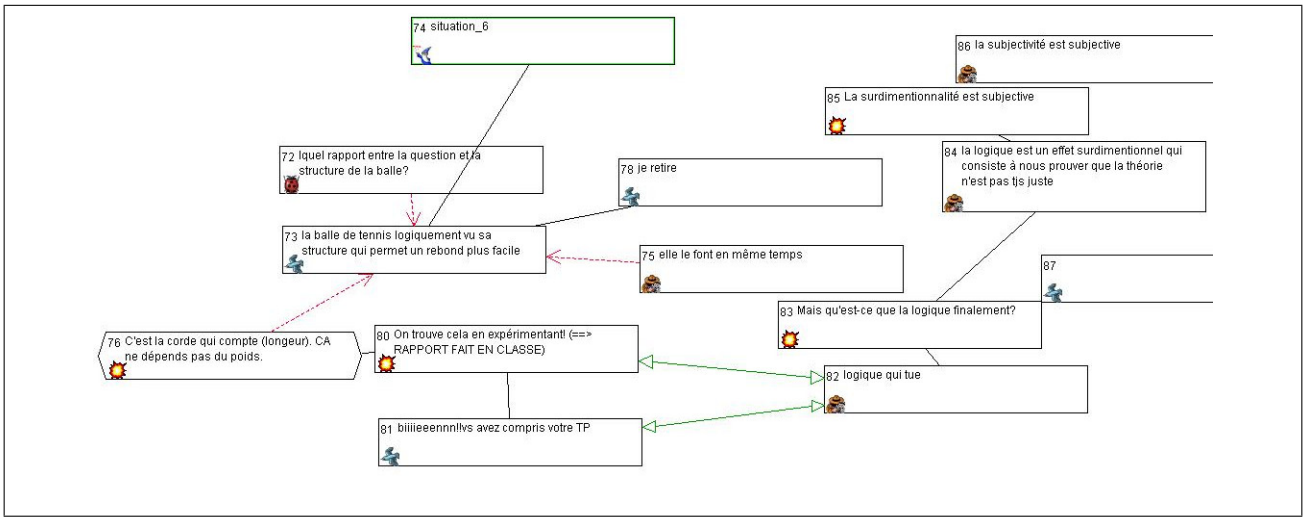


FIGURE C.8 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe A, item #6.

C.4.2 Groupes de la demi-classe A

- : Henriette, Marie, Rose et Thibault
- : Germaine, Ilona, Urs
- : Alain, Etienne et Pierrette
- : Daniel, Nina et Yves

- lien neutre entre interventions
- lien de support à une intervention
- lien d'opposition à une intervention

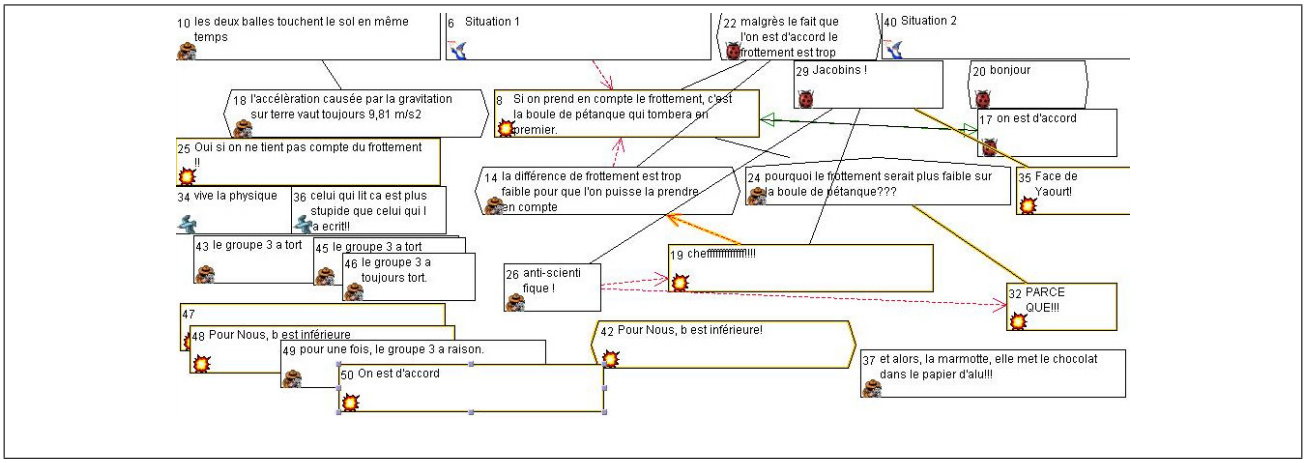


FIGURE C.9 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #1.

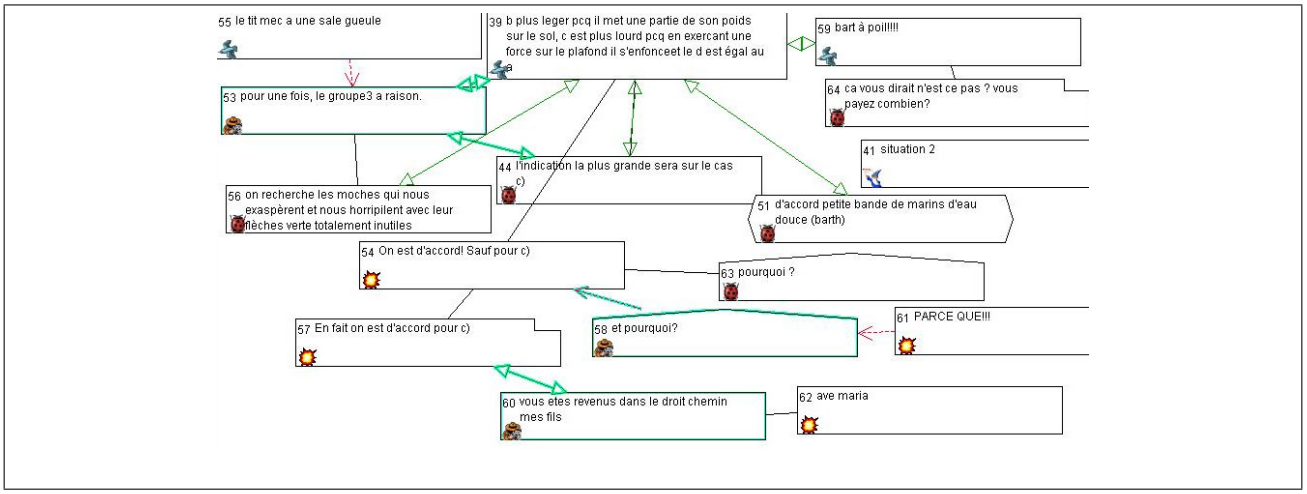


FIGURE C.10 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #2.

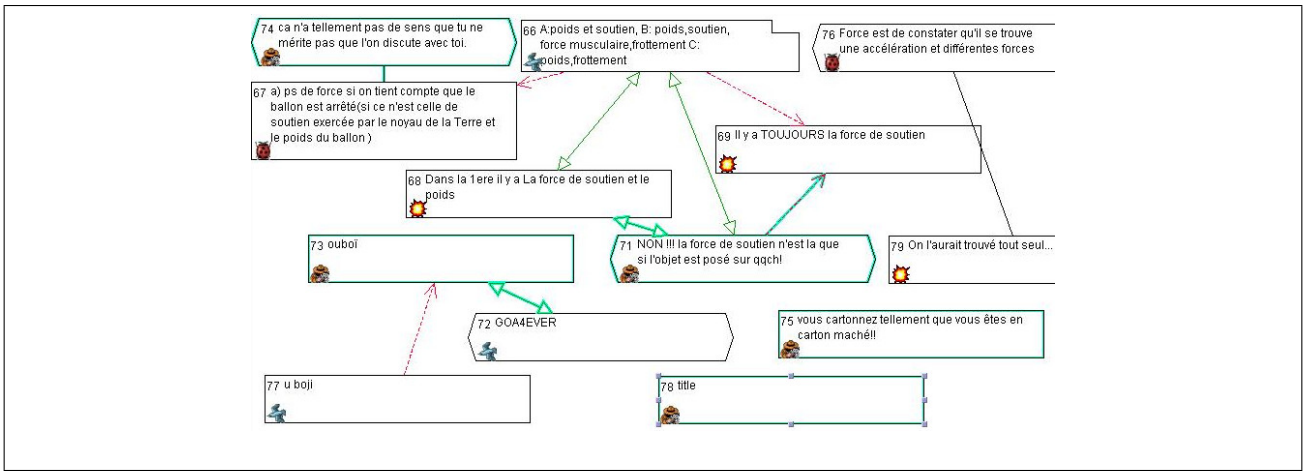


FIGURE C.11 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #3.

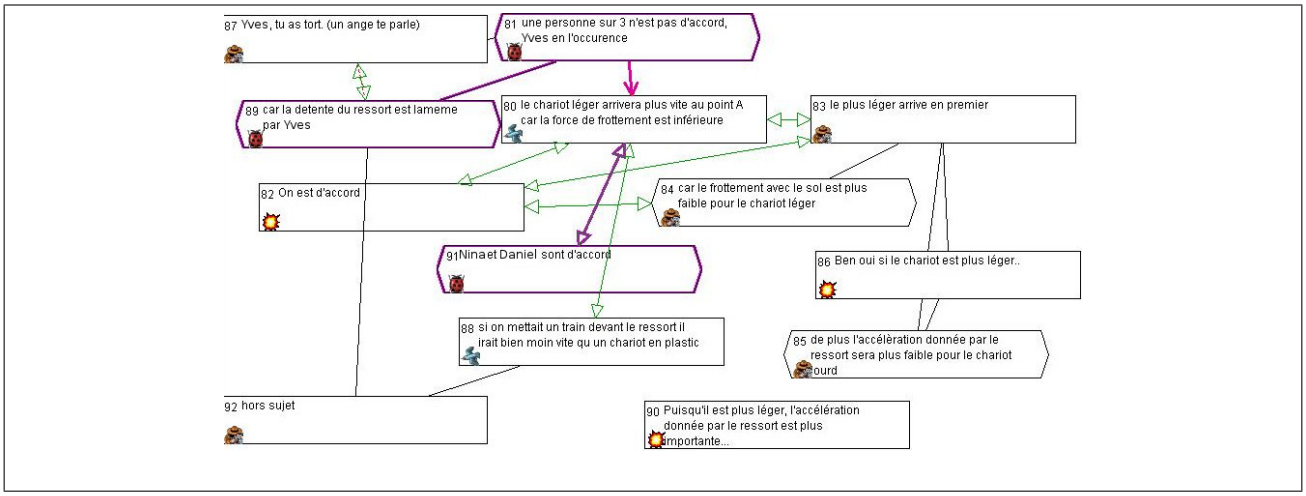


FIGURE C.12 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #4.

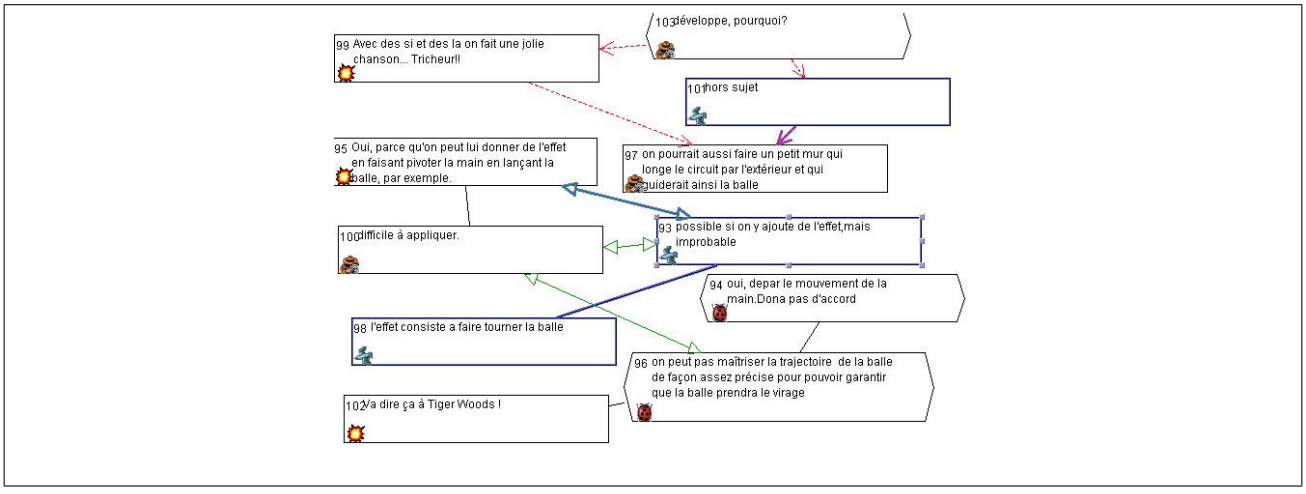


FIGURE C.13 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #5.

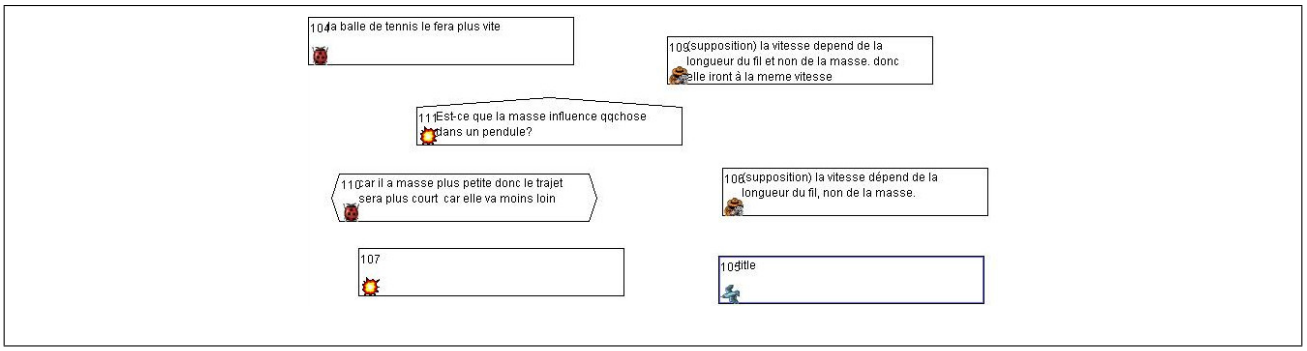


FIGURE C.14 – Graphe d'argumentation *Digalo* de la demi-classe B, item #6.

C.5 Extraits du *mémoire professionnel* de l'enseignant

L'enseignant explique comment il présente le pré-questionnaire aux élèves et cherche à introduire un autre rapport à l'erreur dans le milieu didactique :

Extrait du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p.16

J'ai précisé que ce travail ne fera pas l'objet d'une évaluation pour éviter le stress et l'angoisse chez eux. Je leur ai conseillé de prendre le temps nécessaire pour répondre à chaque situation afin d'éviter toute précipitation inutile. Les élèves ont peur de "répondre faux". J'ai ajouté que tout apprentissage implique le droit à l'erreur. J'ai bien pris conscience du problème du rapport à l'erreur qui était très présent. Ce questionnaire contient des questions de type situation-problème présentant des situations familières, où les élèves doivent prédire et expliquer ce qui va se passer. L'anticipation des phénomènes semble être un des moyens les plus efficaces pour obliger les élèves à expliciter leurs conceptions. Le fait de faire appel à des situations familières devrait favoriser la compréhension des questions, tout en limitant les réponses dans lesquelles les élèves récitent leurs cours sans donner d'explication.

L'enseignant commente également l'utilisation de la modélisation sur ordinateur sur le logiciel *Marbles Move* :

Extraits du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p.26

La modélisation, au même titre que l'expérimentation, fait partie intégrante de notre enseignement. On constate malheureusement qu'elle prend peu de place, voire aucune dans l'enseignement. (...)
Certains élèves ont compris qu'un modèle ne sera jamais la réalité, en effet "l'intérêt d'un modèle ne se mesure pas dans sa vérité mais dans son utilité" G. de Vecchi. (...)
Cette séquence a bien fonctionné. Au début, les élèves ont approché l'outil en le considérant comme un jeu mais quelques temps plus tard, ils se sont vraiment impliqués et ont progressé dans cette activité. Malgré tout, il ne s'agit pas d'une recette miracle qui marche à tous les coups. ert ce sont des outils à manipuler avec précaution pour ne pas créer de situations générant des obstacles en plus pour l'élève.
Cette activité a été également très enrichissante pour moi car j'ai appris à manipuler un nouvel outil informatique et à le "transmettre" à mes élèves. Elle a été aussi une occasion de contacts fructueux avec les élèves et un bon moyen pour me remettre en cause et améliorer ma pédagogie. Elle m'a permis de rester proche des préoccupations de mes élèves.

L'enseignant comment le déroulement de la leçon centrée sur les postes expérimentaux, à la phase 4 de la séquence :

Extraits du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p.27

Dans cette activité, j'ai proposé à mes élèves des Travaux Pratiques de Sciences

Physiques inspirés du questionnaire. (...) Les élèves réalisent une réflexion personnelle qui va permettre l'appropriation de la situation et du problème, ainsi que la mise en place d'échange avec émergence d'un questionnement, d'affirmations plus ou moins précises, de constats, de désaccords, de confrontation d'idées, d'arguments. Les élèves transforment leurs affirmations et le produit de leurs conceptions en hypothèses avec l'obligation de les écrire. L'obligation d'écrire le résultat de la réflexion force l'élève à affronter l'obstacle de la verbalisation et à concrétiser le fruit de son travail, ce qui est très important.
L'objectif didactique visé est la mise en défaut des conceptions "erronées" des élèves de façon probante. La démonstration doit être convaincante sinon la conception n'en sortira que renforcée!
(...)
La plupart des élèves ont trouvé qu'il n'y avait pas de difficulté particulière pour la réalisation des expériences. Le travail de groupe s'est déroulé comme je l'ai souhaité, les élèves ont pu s'exprimer sans complexe. Les élèves m'ont rendu, à la fin de la séance, leur compte-rendu. Ceci m'a permis de savoir si l'objectif a été atteint ou pas.
Au cours de ces TP, j'ai constaté un manque d'investissement et une dévalorisation de l'activité expérimentale de la part d'une minorité d'élèves. Même s'ils restaient enthousiastes, le sens et le contenu de ces séances leur échappaient. L'expérimentation est une des composantes principales de l'enseignement de la physique. C'est en effet via l'activité expérimentale que l'élève doit acquérir les bases lui permettant d'assimiler son cours. L'élève devient acteur; il remet en cause lui-même ses conceptions "naïves". Il est difficile de faire un bilan de cette expérimentation. Il semble que les élèves étaient satisfaits à une large majorité. Les résultats montrent aussi que cette démarche a eu un impact plutôt favorable sur l'évolution des conceptions.

L'enseignant fait un bref bilan de la séquence effective en conclusion :

Extraits du mémoire professionnel de l'enseignant-stagiaire p.31-32

Mon hypothèse était que mettre l'élève au centre de son apprentissage dans une démarche socio-constructiviste permettait de faire évoluer ses conceptions. Au cours de l'expérience menée en classe XX au Gymnase XX, la mise en place de cette pédagogie a produit les résultats suivants:
- Elle m'a permis de connaître le niveau réel de mes élèves avant de commencer une séquence.(...)
- Elle a permis aux élèves de prendre conscience de leurs erreurs.
(...)
Lors de la comparaison effectuée entre les deux classes concernées, cette méthode a permis à la classe test d'obtenir de meilleurs résultats que la classe témoin. Par conséquent, cette pédagogie, en plaçant l'élève au centre de l'apprentissage, semble permettre aux élèves de progresser. Mon hypothèse semble donc validée à l'essai.
(...)
J'ai ressenti que les élèves ont pris du plaisir à travailler ainsi, ils m'ont d'ailleurs proposé de continuer d'enseigner de cette façon.(...)

```
17 Les Travaux Pratiques de Sciences Physiques ont été très profitables. Ils ont
18 permis une meilleure implication des élèves en créant ainsi de meilleures
19 conditions de travail dans le laboratoire. Ce qui a entraîné une amélioration
20 dans les connaissances acquises par les élèves lors des TPSP ainsi que sur leurs
21 conceptions. D'un point de vue personnel ,l'application de cette démarche m'a
22 permis de voir la méthode d'enseignement autrement mais aussi la difficulté de
23 sa mise en place et de sa gestion. En effet, il faut accepter de travailler plus
24 lentement au début mais aussi de se retrouver face à des situations non prévues:
25 qu'est-ce que je fais avec une question d'un élève? "je réponds!", "je ne réponds
26 pas!", "j'attends!", "je demande aux autres élèves!", ... Il faut s'adapter à des
27 situations pédagogiques toujours différentes avec des élèves qui sont différents.
28 Mais ma plus grande joie est de voir qu'un apprenant "désespéré" approuve un
29 certain intérêt pour les sciences physiques.
30
```

C.6 Transcriptions

Les transcriptions ci-dessous présentent des propos produits à l'oral pendant la séquence. Elles permettent au lecteur de retrouver rapidement ces transcriptions, et parfois une version plus complètes des interactions verbales reproduites dans la partie III. Pour faciliter leur mise en lien avec cette partie, elles sont organisées en fonction des situations de malentendu où l'analyse s'y réfère.

C.6.1 Situation de malentendu #5

Voici un extrait des échanges entre Aurélie, Barbara et Sylvie sur le poste expérimental relatif à l'item #4 du questionnaire pré-séquence.

Enregistrement de Aurélie Barbara Sylvie - activité expérimentale - item #4

```
1  Aurélie: là est-ce que vous pourriez m'expliquer pourquoi
2  Sylvie:  fais-gaffe
3  Aurélie: mais j'ai pas fais exprès
4  Sylvie:  ben j'imagine
5  Aurélie: pourquoi heu - pourquoi le fait que ce soit plus léger (au final) c'est
6           pas pareil tu pourrais m'expliquer
7  Sylvie:  je pourrais pas te dire (...)
8  Sylvie:  parce que le poids c'est en fonction de la masse
9  Barbara: parce que le poids là quand on les lâche il est exercé sur sur rien du
10          tout
11 Sylvie:  le poids c'est toujours la même chose (.) il attire toujours en fonction
12          de la masse mais à la même vitesse
13 Barbara: comme il est exercé sur heu - sur aucun objet il tombe directement (.)
14          ben (.) on en tient pas compte (.) alors que là ben le poids il est exercé sur
15          la table (...)
16 Aurélie: alors là j'y pige absolument rien
17 Sylvie:  en fait là ((geste horizontal, pointe le matériel de l'item 4) ça dépend
18          pas en fonction du poids de ce que - de ce qui est attiré à la terre alors que
19          là ((geste vertical, pointe le poste de l'item 1)c'est- c'est en fonction du
20          poids
21 Barbara: ouais ouais ben c'est ça
22 Sylvie:  ici [c'est en longueur ((geste horizontal le long de la table))
23 Aurélie: non ici] ((geste horizontal, pointe le matériel de l'item 4)) c'est en
24          fonction du poids et là-bas ((geste vertical, pointe le matériel de
25          l'item 1)) c'est pas en fonction du poids
26 Sylvie:  non en fonction de la masse (.) c'est pas la même chose masse et poids
27          (.) le poids c'est ce qui attire à la terre (...)
28 Sylvie:  va demander au prof si tu me crois pas arrête de faire cette tête comme
29          si je te-
30 Aurélie: moi je comprends pas c'est tout !
31 Sylvie:  le poids c'est pas la même chose que la masse (.) poids n'est pas égal à
32          la masse
33 Aurélie: ouais bon maintenant écris ce que tu voulais écrire (...)
34 Aurélie: bon celui-là il faut encore faire
```

```
35 Sylvie:  mais c'est grave si tu crois pas
36 Aurélie: mais je sais pas moi je je j'ai pas compris alors je te laisse écrire là
37 Sylvie:  mais tu veux écrire [où ?
38 Aurélie: ici] ((soupir))
39 (...)
```

30.01.2007 17'-18'

C.6.2 Situation de malentendu #6

Cette situation de malentendu fait essentiellement référence à un long passage qui reprend les interactions verbales des élèves du groupe composé d'Aurélie, Barbara et Sylvie de la $29^{ème}$ minute de la $1^{ère}$ leçon de Travaux pratique, à la $17^{ème}$ minute de la seconde leçon, ou $62^{ème}$ minute de leçon. Comme les extraits présentés lors de l'analyse sont produits en fonction des besoins de l'analyse, l'ensemble du passage est présenté ci-dessous dans la séquence chronologique, qui comprend les cinq épisodes suivant (voir aussi le synopsis reproduit ci-dessous) :

1. Le dialogue des élèves sur l'exercice 5D.

2. La négociation des élèves avec le groupe.

3. Le dialogue des élèves reprenant l'exercice 5D après la pause.

4. La conversation parodique qui constitue l'incident critique ayant permis l'analyse de la situation de malentendu.

5. Le dialogue des élèves terminant l'exercice 5D après la parodie.

Nota bene : Les minutes indiquées en fin de transcription sont décalées par rapport au minutage du temps de la leçon, parce qu'elles font références au fichier audio utilisé par le chercheur et non à la chronologie de la leçon.

C.6.2.1 Synopsis

temps	interlocution	thème
$0'$	*conversation entre élèves*	*hors sujet, mise en activité*
$7'$	*allocution de l'enseignant*	*consignes et explications*
$11'$	*dialogue entre élèves*	*exercices* $4C$ *et* $5A$
$15'$	*dialogue entre élèves et enseignant*	*exercice* $5A$
$16'$	*dialogue entre élèves*	*exercices* $5B$ *et* $5C$
$21'$	*dialogue entre élèves et enseignant*	*exercice* $5C$
$29'$	*dialogue entre élèves*	*exercice* $5D$
$39'$	*négociation entre élèves et enseignant*	*exercice* $5D$
$45'$	*pause de* $10'$	*fin de la* $1^{\text{ère}}$ *leçon*
$55'$	*conversation entre élèves*	*hors sujet*
$56'$	*dialogue entre élèves*	*exercice* $5D$
$60'$	*conversation entre élèves*	*parodie de la physique*
$62'$	*dialogue entre élèves*	*fin de l'exercice* $5D$
$63'$	*dialogue entre élèves et enseignant*	*exercice* $5E$ *et* $5F$

C.6.2.2 Premier épisode

Voici la transcription du premier épisode de l'échange :

Transcription 18. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 29' à 39'

Enregistrement audio

((début exercice D))
Aurélie: okay::?
((rire))
Aurélie: on va mourir hum (.)
Sylvie: là faut qu'on mette toutes les forces alors(...)
Aurélie: attend
Sylvie: ah non c'est un parcours horizontal
Aurélie: la bille si jamais c'est rond
Sylvie: ah ouais
((rire))
Sylvie: Ah donc on a la force de frottement on a le poids on a le soutien qui s'enlève (.) et on a plus rien d'autre hein le truc devant il y a pas-
Aurélie: ouais
Barbara: [alors
Sylvie: donc] on a juste moins f est égal à m a (.) non il n'y a pas de force de traction ou (.)
Aurélie: je sais pas ils disent pas qu'on néglige la force par hasard de frottement
Barbara: non il faut justement la [trouver
Aurélie: ah] attend je peux relire moi parce [là
Barbara: ouais]
Sylvie: en Newton
Barbara: mais est-ce qu'on a une force qui est la même
Aurélie: instantané ça veut dire quoi-
Barbara: c'est au moment ouais à un moment donné à à zéro je pense au début quoi (.) mais là (.) c'est juste le truc là comment il y a encore une force là-dessus sur [la
Aurélie: non il y a plus rien] c'est moins f est égal à m g
Barbara: est égal à m a
Aurélie: à m a (...)
Barbara: donc
Aurélie: on sait qu'elle a une décélération de six mètres (.) sur cent mètres (.) elle diminue de (.) elle diminue de six mètres (.) sur cent mètres
Barbara: il faut l'accélération peut-être là
Aurélie: attend mais c'est une décélération là juste un truc (.) sur cent mètres elle diminue de six mètres donc sur un mètre elle diminue de combien (...) de zéro virgule zéro six (...)
Sylvie: il y avait une formule a est égal il faut qu'on il faut qu'on il faut qu'on
Aurélie: faut qu'on
((bruits d'ouverture de dossier et de pages))
(...)
Sylvie: ah a est égal à (.) à delta de v sur delta de t donc égal à la [vitesse

44 | | finale
45 | Aurélie: | vitesse finale]
46 | Sylvie: | trente moins trente six sur (.) ah non mais c'est pas le temps
47 | | qu'on doit avoir (.) on a pas le temps on a le
48 | Aurélie: | mais ça c'est la vitesse c'est juste et puis le temps c'est quoi-
49 | Sylvie: | mais il n'y a pas de temps [justement
50 | Aurélie: | mais si]
51 | Sylvie: | non c'est pas le temps
52 | Aurélie: | elle diminue de dix mètres (.) attends (.) [sur cent mètres
53 | Sylvie: | on doit voir] avec pas le temps mais les (.) on doit prendre une autre
54 | | formule
55 | Aurélie: | attends je crois qu'on doit faire le truc de trois
56 | Sylvie: | je sais pas il y a aussi un truc
57 | Aurélie: | faut que ce soit un truc où il y a (.) le (.) le (...) les mètres non
58 | | pas les mètres (.) mais ça c'est pas vitesse finale dans les bouquins pis
59 | | ben c'est zéro non-
60 | Sylvie: | non parce qu'en fait on a deux deux en cent mètres on a le (.) on a pas
61 | | le temps on sait pas en combien de temps elle a fait ça (...)
62 | Aurélie: | mais si on peut savoir parce qu'on sait qu'elle a une accélération enfin
63 | | on sait qu'elle roule de trente six mètres par seconde et que au bout de six
64 | | mètres elle descend à trente mètres par seconde donc on peut savoir qu'en cent
65 | | mètres combien de secondes elle fait
66 | Barbara: | au bout de six mètres au bout de cent mètres elle elle décélère de six
67 | | mètres
68 | Aurélie: | ben oui j'ai compris ça mais tu peux savoir en combien de temps
69 | E: | dans d'autres feuilles où il y a déjà la valeur de de alpha (.) ici c'était
70 | | trente
71 | Sylvie: | a mais c'est pas grave
72 | E: | c'est c'est pas grave ouais si vous avez pris vingt c'est pas grave
73 | Aurélie: | regarde tu sais que pendant cent mètres elle fait trente mètres par
74 | | seconde
75 | Barbara: | il [faut pas trouver le temps avec heu les trucs international là-
76 | Aurélie: | et tu sais que tu sais le temps ben oui justement] (.) heu je sais pas
77 | | attends
78 | Barbara: | [temps est égal à dix non temps égal zéro
79 | Aurélie: | dix mètres par seconde trente six mètres par seconde] donc cent divisé
80 | | par trente six (.) cent divisé par trente six (.) et puis seconde (...) v est
81 | | égal à l sur t
82 | Sylvie: | donc v est égal (.)
83 | Barbara: | v égal à d sur t ouais donc d est égal à v [sur t
84 | Aurélie: | v sur t]
85 | Barbara: | ouais je crois que c'est distance sur temps et là on sait non la
86 | | distance-
87 | Aurélie: | ouais
88 | Barbara: | à moins que tu veux juste changer maintenant
89 | Sylvie: | ouais mais là on sait de nouveau pas le temps
90 | Aurélie: | mais justement on fait [(X)
91 | Barbara: | on isole t] (...)
92 | Sylvie: | non c'est pas fois d (.) c'est pas fois d

Aurélie: c'est quoi la formule de départ v est égal à d sur t (.)
Barbara: ben [(X)
Aurélie: (X)] t est égal à d sur v ouais
Barbara: mm donc d sur v distance c'est quoi ici
Sylvie: et la vitesse
Aurélie: trente six sur heu trente six mètres par seconde
Barbara: donc trente six moins trente donc six donc cent divisé par six
Aurélie: tu crois
(...)
Aurélie: non mais ça c'est la différence de vitesse c'est pas ce qu'on recherche sur ces cent mètres elle va faire en moyenne ah
Sylvie: on essaye de trouver temps on sait que temps égal d sur v donc la distance c'est cent et la vitesse (.) la [décélération
Aurélie: la vitesse] c'est pas six mais oui mais on demande pas la décélération il te demande la vitesse
Sylvie: oui mais c'est ça
Aurélie: mais c'est pas six mètres par seconde la vitesse
Sylvie: c'est moins six mètres par [seconde
Aurélie: mais non] c'est pas la vitesse qui fait là
Barbara: mais là on peut pas savoir (.) prend [la vitesse moyenne
Sylvie: c'est la vitesse de] à ce moment-là
Aurélie: mais il fait trente six mètres par seconde ensuite il diminue
Sylvie: mais la vitesse moyenne c'est trente six moins trente
Aurélie: mais non
Sylvie: c'est quoi alors
Aurélie: ça c'est la différence de vitesse entre les deux c'est la décélération c'est pas la même chose la décélération et puis la vitesse
Sylvie: donc c'est quoi la vitesse-
Aurélie: la vitesse je sais pas il faut prendre une moyenne de deux je pense [parce que
Barbara: soixante] six divisé par (X)
Aurélie: cent (.) trente six mètres par seconde] après il diminue diminue jusqu'à trente mètres par seconde donc on prend trente trois on prend la moyenne des deux
(...)
Barbara: donc t c'est trois virgule
Sylvie: trois virgule quatre.
Aurélie: trois secondes quoi (...)
Sylvie: attends je veux juste voir quand même (...)
Aurélie: je crois qu'on a fait un truc rien à voir là
Barbara: moi aussi je crois
Aurélie: non mais pas par rapport à sa mais [rien de
Barbara: oui oui] par rapport à (X)
Aurélie: lorsque le bille numéro un a une vitesse de deux kilogrammes on devait d'abord commencer par ça on a fait quoi on a rien fait on a juste lu la donnée et on a commencé à faire des calculs rien à voir on devait d'abord regarder ça (.) lorsque la masse truc
Sylvie: mais on a trouvé a
Aurélie: on est censé avoir trouvé a et maintenant on sait que
Barbara: on peut trouver

```
142 Sylvie:   moins s égal à deux fois
143 Barbara:  je sais pas si c'était juste on demande quoi on peut pas tout faux après
144 Sylvie:   ouais
145 Aurélie:  ah oui juste un nonante cinq (.)
146 Sylvie:   on demande (.) monsieur pour trouver l'accélération on sait que que
147           l'accélération c'est égale à ça
148 E:        mm
```

C.6.2.3 Deuxième épisode

Voici la transcription du deuxième épisode de l'échange :

Transcription 19. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 39' à 41'

Enregistrement audio

```
1  Sylvie:   on demande (.) monsieur pour trouver l'accélération on sait que que
2            l'accélération c'est égale à ça
3  E:        mm
4  Sylvie:   et on a voulu trouver le temps (.) le temps c'est bien d sur v non-
5  E:        attention là vous mélanger des choses (.) celle-là on l'utilise quand quand
6            on a m r u a mouvement rectiligne uniformément accéléré cette formule on
7            l'utilise quand quand on a mouvement rectiligne uniforme pas accéléré
8  Sylvie:   mais alors comment on fait pour trouver le temps-
9  E:        on a d'autres formules
10 Sylvie:   j'ai pas ma gomme (...)
11 E:        vous avez le petit formulaire que j'ai donné la dernière fois-
12 Sylvie:   ben pas là non
13 Barbara:  j'ai le formulaire moi (bruit d'ouverture de sac et de pages) (...)
14 E:        alors ici on a mouvement uniforme (.) vous avez utilisé vous avez utilisé ah
15           vous avez déjà effacé (.) vous avez utilisé delta de v sur delta de t [(X)
16 Sylvie:   (X)]
17 E:        alors regarder pour trouver t vous avez encore deux formules mais pour
18           le mouvement uniforme accéléré
19 Sylvie:   oui
20 E:        vous avez celle-ci (.) et celle-là (.) ça dépend de ce que vous connaissez
21 Aurélie:  mais (.) mais dans aucun des cas on sait a
22 E:        mais a vous avez déterminé par cette formule-là (.) d'accord-
23 Aurélie:  oui mais ça c'est faux (.) parce que justement on chercher le temps
24 Sylvie:   et on sait pas le temps
25 E:        alors comment on calcule l'accélération-
26 Sylvie:   mais même dans toutes ces formules il y a le temps et on ne connaît pas
27           le temps
28 E:        tout à fait alors vous utilisez autre chose (.) f est égal à m a pour retenir
29           l'accélération
30 Sylvie:   mais justement on cherche a pour trouver moins f
31           ((rires))
32 E:        alors vous avez ici la masse vous avez delta ici (.) on est toujours sur un
33           plan horizontal
34 Sylvie:   mm
```

E: alors vous avez la vitesse instantanée on cherche le temps donc on a après un certain temps donc on a un parcours de cent mètres
Sylvie: mm
E: ça c'est quoi
Sylvie: la distance
E: regardez (.) vous avez la distance x et r
Sylvie: oui
E: ça c'est le temps que vous cherchez et encore a qui est inconnu alors pour calculer tout ça vous avez f qui est égal à m a maintenant ça nous reste a alors comment calculer a dans ce cas-là (.) alors il faut juste faire attention on a deux types de mouvement on doit pas utiliser cette formule là parce qu'il s'agit ici de mouvement rectiligne uniformément accéléré
Sylvie: oui mais de toute manière même si on utilise cette formule on a deux inconnues on peut pas on [aura du mal à trouver
E: alors pour trouver l'autre inconnue] comment il faut faire (.) la somme des forces on a m a
Sylvie: on peut toujours changer que a est égal à heu (.) mm moins f sur m mais je sais pas ça nous fera quand même deux inconnues je sais pas on pourra pas trouver je vois pas je vois vraiment pas
E: alors on a la vitesse de la bille (.)
Sylvie: ouais
E: alors au début à l'horizontal et après donc à la fin du parcours on a cent mètres (.) d'autres formules on avait quatre formules pour m r et a
Sylvie: je sais plus mais
E: ou bien exactement où il n'y avait pas le temps alors je vais vous montrer toutes les formules alors qu'est-ce qu'on avait (.) alors maintenant c'est pour r m u a
Sylvie: mm
E: alors là qu'est-ce qu'on avait on avait tout d'abord a c'est delta v sur delta t
Sylvie: mm
E: ça c'est ok
Sylvie: mm
E: alors on a x de t un demi a t carré zéro x de t plus x zéro
Sylvie: mm mais ça on peut pas l'utiliser parce qu'il y a
E: tout à fait on a v de t a t plus v zéro
Sylvie: on peut pas utiliser non plus
Barbara: non ça joue pas
E: v au carré v zéro au carré v a (.) vous vous rappelez de cette formule-
Barbara: [mm
Sylvie: non] je ne me souvenais pas
Aurélie: ouais ça on peut le [faire
E: on peut trouver] et là qu'est-ce que vous avez
Sylvie: ben on a la distance
A. ben là on peut [trouver a
Barbara: ah ouais on a la] distance
Aurélie: donc en fait on a même plus besoin de calculer avec le temps
Barbara: ben c'est la deuxième vitesse
E: le cours c'est ici votre cours c'est ça regardez vous avez x plus (X) m égal

```
84          t carré vous pouvez utilise celle-là celle-là non plus v au carré égal à v zéro
85          plus deux a x v zéro et celle-ci moi j'ai fait moins v zéro donc ça revient au
86          même
87  Sylvie: ouais. ben en tout cas pour calculer on a plus besoin de faire ça puis
88          tu me donnes le (X)
89  E:      vous êtes d'accord
90  Barbara: ben attends mais je pense si je regardais un peu (X)
91  E:      alors prenez s'il vous plaît une pause
```

C.6.2.4 Troisième épisode

Les élèves reprennent après la pause :

Transcription 20. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 56' à 60'

Enregistrement audio

```
1   Aurélie: bon on en était où
2           ((rire))
3   E:      vous continuez s'il vous plaît
4   Sylvie: oui (.) alors (..) hum la vitesse initiale c'est trente-six (..)
5   Aurélie: la vitesse finale c'est [trente
6   Sylvie: trente] au carré
7   Aurélie: non
8   Sylvie: ben si (.) V au carré
9   Aurélie: non (.) faut d'abord mettre la vitesse initiale (.) trente-six au carré
10          moins trente au carré (.)
11  Sylvie: mais V zéro c'est la vitesse initiale
12  Aurélie: a:: ouais juste
13  Sylvie: est égale [à V fois a
14  Aurélie: aussi au carré] trente-six au carré
15  Sylvie: a ouais
16  Sylvie: mais après je sais pas si ça c'est quoi? c'est distance
17  Aurélie: la distance c'est cent
18  Barbara: ouais
19  Sylvie: heu (.) zéro moins cent (.)
20          ((rire étouffé))
21  Barbara: non c'est cent (.) la distance
22  Sylvie: voilà(.) bon (.) alors (.) a est égal à
23          ((rires))
24  Aurélie: je peux faire?
25  Sylvie: oui (..) t'as vu c'est ça le truc que j'ai trouvé
26  Barbara: il est cool
27  Aurélie: que t'as trouvé où?
28  Sylvie: ben: (.) quand j'ai rangé mes affaires
29  Aurélie: tu peux faire trente-six au carré? (..)
30  Barbara: mille deux cents nonante-six
31  Aurélie: tu peux faire (.) neuf cents moins mille deux cents nonante-six (...)
32  Barbara: moins trois cents nonante-six (..)
33  Aurélie: et puis tu fais trois cente nonante-six divisé par deux [cents
```

```
Barbara:  moins] trois cents non- ah trois cent nonante-six (..) un virgule
          nonante-huit (..)
Aurélie:  c'est l'accélération de [temps
Sylvie:   ça c'est la décélération de un virgule nonante-huit mètre par seconde
          donc (.) okay ben maintenant il faut trouver h carré
Barbara:  ouais ben (.) a est égale à moins ça
Aurélie:  mais oui mais (.) mais c'est une décélération
Sylvie:   mais il faut le (.) le prendre en compte alors maintenant (.) on a a est
          égal à moins trente-deux virgule
Barbara:  nonante-huit
Sylvie:   nonante-huit (...) et maintenant (.) moins f est égal (.) à (..) ici (.)
          moins f (.) est égal (.) à deux fois (.) un virgule nonante-huit (..) (X) (X)
          (X): (X) (X) (X) (X): (X) (X)
Aurélie:  incroyable?
Barbara:  attend (..) comment t'as fait ça?
Aurélie:  incroyable
          ((rires))
Sylvie:   quoi?
Barbara:  comment t'as fait ça?
Aurélie:  ouais comment t'as fait ça?
Sylvie:   mais de tête je sais pas
Barbara:  non mais comment? (.) [enfin
Sylvie:   ben] un virgule neuf fois deux ça fait deux (.) nonante fois deux ça fait
          quatre-vingt ça fait trois quatre-vingt [plus douze ça fait (X)
Barbara:  ben:: voyons::] c'est normal
          ((rires))
          ((chuchotement))
Aurélie:  on fait chacun son tour (.) vas-y (.) commence
          ((chuchotement))
```

C.6.2.5 Quatrième épisode

Voici la parodie jouée par ces élèves :

Transcription 21. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 60' à 62'

Enregistrement audio

```
          ((chuchotements))
Aurélie:  on fait chacun son tour (.) vas-y (.) commence
          ((chuchotement))
Barbara:  c'est tellement bien la physique et puis franchement quoi (.) j'atteins
          un orgasme à chaque fois
          ((rires étouffés))
Barbara:  non mais (.) franchement (.) bon ben arrêter moi j'aimerais bien faire
          le suivant (.) alors (.) comment ça se passe?
          ((rires))
Sylvie:   ta gueule
Barbara:  le suivant il faut faire l'accélération avec les Newton (.) non?
Aurélie:  ouais mais divisé par le (.) le cosinus de (.) alpha-
```

Barbara: et puis par la tangente de (.) de:-
Aurélie: de deux-cent quatre-vingt [là-
Barbara: deux] cents [cinquant-neuf
Aurélie: parce que deux cents] [quatre-vingt c'est-
Barbara: non de deux cents cinquant-neuf] virgule quatre-vingt six
Aurélie: voilà parce que deux cents quatre-vingt c'est le log de cinq cents virgule quarante trois moins
Barbara: et puis ça veut dire que (.) en fait le cosinus qui est par là le sinus
Aurélie: (rire)
Barbara: va avec la tangente parce que chaque angle de deux cents nonante neuf virgule cinquante-huit virgule cinq- ((rire))
Aurélie: voilà (.)
Barbara: ça part en fait en [décilitre
Aurélie: oui mais comme] c'est des pommes de terre tu peux pas dire que- ((rire)) (..) non mais il y a l'accélération du soleil (.) il y a le système (..) de l'espace qui donne de
Barbara: ouais mais en fait l'accélération g (.) non enfin (.) g (..) neuf virgule quatre-vingt un (.) ça (.) en fait ça (.) ça diminue tout sur (.) sur en fait l'accélération heu (.) solaire (.) [du système solaire
Aurélie: mais si vous avez des salades? ((rires))
Barbara: oui mais c'est pas la raison pour que (.) pour que l'hypothènuse elle soit heu (.) partante avec la tangente
Aurélie: ben si parce que si tu prends l'hypothènuse avec la tangente ça joue pas
Barbara: ben non-
Aurélie: ce sera pas vert
Barbara: et pis l'influence de l'air ? ((rire)) avec tous les molécules et [puis les photons
Aurélie: mais non mais tu] là on est dans l'espace on est pas dans l'air hein
Barbara: oui mais bon
Aurélie: [regarde?
Barbara: autant] les électrons qui tournent autour du noyau on les néglige?
Aurélie: ((rire sonore))
Barbara: voyons on les néglige? (.) vu que la masse du noyau elle est (.) en fait la masse (.) du (.) du noyau est égale au noyau
Aurélie: [ouais
Barbara: non] de l'atome est égale à la masse du noyau [en-
Aurélie: non] [la masse de l'atome
Barbara: parce qu'on] néglige les électrons (..) et puis [ce qui fait qu'on-
Aurélie: non mais je] ne comprends pas (.) pourquoi on négligerait les électrons ? les électrons c'est quand même [un élément
Barbara: mais les électrons] c'est parce que ça tourne autour du noyau madame
Aurélie: ben oui [il y a un mouvement
Barbara: et puis après] [il n'y a plus d'électrons solaires sur la moléculaire
Aurélie: mais le soleil il pourrait plus marcher s'il n'y avait plus d'électrons (.) on peut pas les négliger ces électrons
Barbara: oui mais ça dépend (.) de temps en temps on les néglige de temps en temps pas (.) ça dépend [en fait ce que tu veux chercher
Aurélie: (X) (X) (X) (X)]
Barbara: si tu veux chercher la masse du noyau ben (.) genre par exemple avec

```
62          une fleur (.) ben là ben (.) ben il faut qu'on en tienne compte quoi (..)
63  Aurélie: bon (.) alors (.) on va reprendre cette-
```

C.6.2.6 Cinquième épisode

Le dernier morceau de conversation entre les élèves sur cet exercice dans la deuxième leçon, lorsqu'ils reprennent le travail, est reproduit ci-dessous :

Transcription 22. Phase 2 - Activité 5D - Aurélie Barbara Sylvie - 5 décembre - 62' à 63'

Enregistrement audio

```
1   Aurélie: bon (.) alors (.) on va reprendre cette-
2   Barbara: donc maintenant il faut [passer d'une valeur d'accélération
3   Aurélie: ((rire)) (X) (X) (X) (X) (X) (X) (X) (X)
4   Barbara: à une valeur de force] okay
5   Aurélie: voilà j'ai fait ((rire))
6   Barbara: mais est-ce que-
7            ((l'enseignant s'approche))
8   Aurélie: oui?
9   E:       tout à fait (..)
10  Aurélie: mm
11  E:       ((vérifie le résultat écrit)) ouais (.) vous voyez (.) pour une masse de deux
12           kilogrammes on a trois virgule neuf (.) pour une masse de 50 kilogrammes on a ?
13           (.) 99 (.) c'est (.) ça dépend vraiment de?
14  Aurélie: [de la masse
15  Barbara: de la masse]
16  E:       de la masse (.) tout-à-fait (.)
17           ((les élèves passent à l'exercice suivant))
```

Annexe D

Compléments

Sommaire

D.1 Rapport de recherche ESCALATE : extrait concernant *Marbles Move* 931
D.2 Description sommaire d'une leçon typique de Travaux Pratiques 949
D.3 Compléments aux analyses de traces 959
D.3.1 Compléments aux analyses *a posteriori* (ingénierie didactique) 959
D.3.1.1 Synthèse des analyses d'intervalles temporels par type d'activité pour chaque groupe d'élève. 959
D.3.1.2 Graphes des intervalles temporels par type d'activité pour chaque groupe d'élève. 961
D.3.2 Compléments aux analyses de logique naturelle 971
D.3.2.1 Énonciation de la divergence de la situation de malentendu #1 971
D.3.2.2 Énonciation du cheminement #1 de la situation de malentendu #2 . . . 974
D.3.2.3 Énonciation du cheminement #2 de la situation de malentendu #2 . . . 976
D.3.2.4 Énonciation du cheminement du groupe à la situation de malentendu #6 977

D.1 Rapport de recherche ESCALATE : extrait concernant *Marbles Move*

8.4 Case D: Marbles Move

Alaric Kohler

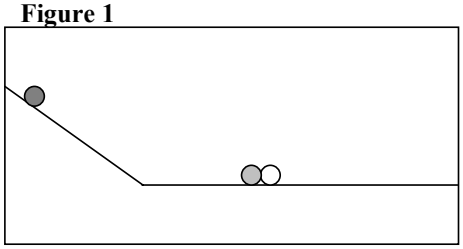
1. Introduction

This part of the chapter describes the implementation of the Marbles move case in a secondary school in Switzerland. Implementing an innovative pedagogical practice is known as a complex process with which any aspect of the context is likely to interact (Garduño, 1998). As the project's framework (timelines, objectives …) can considerably shape the implementation analysed here, the case design and the researcher's activities are included in the following description of the research. In this manner, we hope to offer the reader a situated view on this case implementation within the ESCALATE project. We adress our special thanks to Ph. Drompt for the invitation in his classroom and to F. Boubbadi for his active participation in the research process.

2. Case design

Task

Figure 1



First, the task chosen has to be appropriate for an inquiry and argumentation based pedagogical approach, for making a Microworld, and for the target age group's curriculum in science. The *Marbles move* situation has been elaborated from a task created by Piaget to test children's conceptions on movement and causality. The central phenomenon looks simple (cf. figure 1): one marble on a slope rolls down on a rail till it hits one or more marbles on a horizontal surface. After the first impression of simplicity, this situation opens many complex issues of physics.

Considering the task suitability for an argumentative discussion in physics, we considered two criteria:

1) Does the task leave free space for personal interpretation?
2) Do students, whatever their formal knowledge in mechanics, have different points of view when considering the situation?

The *Marbles move* situation fulfils these two conditions: one can see a marble moving after the collision, whenever another one thinks it stays immobile. The scientific concepts of dynamics underlying the phenomenon are known for bringing up different preconceptions (Viennot, 1979).

Considering the task suitability for creating a Microworld useful for learning, we considered two more conditions:

1) Is it in the available technology range of Microworlds to make a high quality product with this task?
2) Does it offer relevant possibilities of activity for learners?

To answer the first question, the researcher based his judgment on his own knowledge and understanding of the technological requirements of E-Slate platform. Concerning the second point, we hoped that manipulating variables and observing their effects on the marbles dynamics faster and differently than with concrete material would support

inquiry learning and/or feed argumentation. Learning objectives were not set precisely at the moment of choosing a task, so as to avoid difficulties while implementing the task in a school curriculum.

Microworld
The Microworld is the first product of design, due to the project calendar. Indeed, ESCALATE technical partners programming the Microworld needed precise information at the very beginning of the project, which required more effort than just choosing and describing a task. Starting with technological partners presenting half-baked Microworlds in the first project meeting, the researcher designed the Microworld graphics and structure. The idea was to reproduce the tasks in a virtual environment in such a way that students could actively engage in a free exploration of the marbles' movements. This exploration is fostered by displaying a large set of variables that play a role in the marbles' movement and collision, giving the user an adjustable slider for setting each variable value, and displaying each marble velocity in real time (the marbles' positions were added later). The researcher met a physicist in contact with the Institute of Neuchâtel, and asked him to construct an equation underlining the visual simulation of the marbles' movements in the Microworld. This equation had to fulfil several constraints: it needed to be simple enough to be processed by the program language used to build the Microworld (to avoid efficiency problems such as delays or jumps in the displayed movements), to include all variables open to students' inquiry, set by the researcher, to visually simulate the event in the best way possible, and to correspond to the knowledge to be taught. The physicist offered the researcher a relevant and rich mathematical equation to manage the movement of the marbles in a one dimensional trajectory (see the Case template for details), including the effect of each marble mass, ground friction with two factors (dynamic and static), gravity, the marbles' height on the slope, and the marbles' positions on the trajectory.

While this equation did not correspond to standard textbook content, it was based on the requirements of variable definitions that were needed for programming the Microworld. These definitions were used in an equation dealing with the collision simulation, which needed to mathematically account for the interdependence of all variables included in the Microworld. The whole program was based on the velocity of each marble, as this produces the Microworld visual effect when playing the simulation. Using this approach, the researcher needed the physicist to find an equation describing the collision between two marbles, as the determination of each marble's new velocity according to all relevant variables involved in the collision. Above the usual necessary simplification needed in programming work, e. g., choosing which factors to take into account and which ones to ignore (for example, we totally ignored the effect of the marbles rotational movement), there was another limit to the physicist's work: it was framed by the computer program possibilities, only known by the programmer himself.

At the researcher's request, the technical team made some changes to adapt the first versions of the Microworld to pedagogical usability. As these changes were not modifying the global programming approach or the work already done, they were easily and successfully integrated into the Microworld. For example, some sliders' minimal and maximal values were changed to reach a more interesting visual effect, and a feature displaying each marble's velocity was added. In addition, the marbles' numbers were removed while the marbles are moving, because they were turning and therefore misleading the observer and because the equation was treating the marbles as physical

dots slipping and not as balls rolling. The end result of this design process is of a high quality for teachers and educators in terms of possible activities and complexity of the physics model, and for students, in terms of useability and affordances. In addition, the implementation proved the stability of the interface that resisted all kinds of unpredictable manipulations very well.

Pilot case studies
Once the collaborating school was known, it was possible to create the specific scenario with all the details fitting the initial idea of an argumentative and inquiry-based pedagogy, making the best use of ICT tools, and adapting the case to the teacher and/or to the school curriculum constraints. In order to fill in the worksheet and organise a long implementation in the classroom, the researcher carried out some exploratory work with the Microworld. This explorative work consisted of:
1) An activity with, and driven by students at Neuchâtel University: it was aimed at observing how young adults in teacher training programs can use the *Marbles move* situation as a pedagogical activity, and which insights or memories in physics naturally emerge from working on this task. Students were asked to design a scenario able to stimulate discussion, notably with the use of Digalo.

2) An intervention with the Microworld at the secondary school (the implementation school) in order to give the researcher primary feedback from the chosen sample of students: for instance, how did they react to the Microworld and how did they manage to use it in small groups? During this intervention, the researcher interviewed students in groups of three in a separate room, in parallel to the last lesson of the school year. The students had to individually answer a questionnaire with questions about the marbles' movements before and after the collision, and to discuss theirs answers in the group. Then, they were presented with the Microworld with very open instructions, asking them to "explain the phenomenon as best as possible".

3) An exploratory study was conducted with younger children working with the Microworld on simple tasks. Children's activities were video recorded in different conditions, for example, working individually or in pairs. These data allowed us to grasp some early conceptions induced or stimulated by the Microworld.

All these activities helped the researcher to design the sequence and in particular the worksheet accompanying the Microworld activity. The *Marbles move* situation turned out to be very rich in opportunities to study numerous mechanical topics, among which the designer had to choose some to focus on. It provided as well the main ideas and representations about intuitive resources of the students facing this situation. It happened to be quite problematic to reach a conceptual language, even for those having studied theoretical physics before. Digalo maps and recorded conversations analyses were particularly useful in choosing central physics issues for the case. Indeed, the free discussions carried out by the students showed that without any guidelines concerning the content of knowledge or the concepts to study, a lot of different considerations were formulated that cannot be jointly and constructively articulated by the novices. Without a precise pedagogical objective, the activity became too complex and quite discouraging for the learners. This first experience grounded the co-elaboration of pedagogical objectives and the sequence planning with the teacher, responsible for respecting curriculum and other school constraints.

Worksheet

The main activity of the sequence was built to integrate the Microworld and improve argumentation among students. For this activity, the researcher wrote a worksheet for 2-3 practical work lessons, with the assistance of a physics didactics specialist to formulate the instructions addressed to the students. This worksheet was conceived as a guideline for students to carry on an active exploration of the *Marbles move* situation. It follows Papert's (1981) idea of grounding the exploration of Newton's law on students' existing conceptions of the physical world. Students were provided with a worksheet, the digital tool Microworld, in addition to a hands-on experimental system made of a plastic rail with a flexible slope at one extremity, and two different marble sets, one made of wood, another of glass. This dual experimental setting was aimed at fostering students' reflexive comparison between the difficult observation of reality and the easier access through the computer, displaying a simplified model of the phenomenon.

The objectives of this worksheet were to gradually introduce the concept of Force, following Newton's three laws of motion. In an analogous way to Papert in his proposal to use dynaturtles firstly defined with velocity, secondly with acceleration and finally through interaction with other turtles, we chose to structure the worksheet in three parts:

1) Students were asked to describe the movement using marble velocity as a criterion to identify three different phases (one with an increasing velocity, one with a decreasing velocity in the same direction, and finally one with a velocity equal to zero).
2) Students were asked to describe the acceleration of the marbles in each phase.
3) Students were asked to identify when acceleration is not constant, and then to explain why this change occurs; the pedagogical objective of this consideration was to introduce students to their first contact with interaction between particles: friction as the interaction between the ground and the marble, and finally the collision as an interaction between two marbles, which illustrates Newton's third law.

At different stages of these activities, students had to identify variables playing a role in the phenomenon, and try to find out how they are related to each other. When answering on the worksheet, they had to express their descriptions in physics quantities both verbally (i.e., "velocity increase") and symbolically, drawing vectors characterising velocity (direction, sense and strength), acceleration, and force. The final point of this work consisted in drawing all forces applied to the marbles at each phase and during the two -marble collision.

This approach is based on two main choices: first, to focus on qualitative physics, with the hypothesis that this approach is more likely to change the students' misleading preconceptions; second, to leave the learners in front of the phenomenon without disturbing their thinking and observations because of a strong will to guide them towards a formalized knowledge (as a formula). The aim of the activity is to let the students develop a method of systematic observation with the help of the Microworld. We were expecting students to draw meaningful links between variables, and to relate concepts themselves, through their own active handling of variables and symbolic descriptions.

Design as an iterative process
The school organisational setting with practical work lessons every two weeks encouraged an iterative process. Having half the students one week and the other half the next week gave the teacher and the researcher the possibility to construct a representation of students' difficulties with the tasks and knowledge. Indeed, the teacher and the researcher noticed when an instruction was difficult to understand, or an introduction was missing, and adapted the planned scenario to improve this particular point for the next half of the classroom. A specific time after each lesson was dedicated to this exchange between the teacher and the researcher. However, this process was used only for details of the worksheet or for the teacher's introduction to the activities, probably because having very visible effects on students' activities.

3. School context

The school
The French High School of Bienne is situated in a relatively small city (fifty thousand inhabitants, ninety thousand with neighbouring agglomerations) with a traditional bilingual culture (55% Swiss German, 28% French speaking) and a more recent, but nevertheless important, cultural minority from Mediterranean countries (12% including Italy, Spain and ex-Yugoslavian countries). The high school also has a large proportion of students from the well populated surrounding countryside, as it is the only high school for French speaking young people in the area. Socio-economical level is rather low, as the city is developed mostly around the watch industry.

The objectives of this school aim at providing all students general knowledge to prepare them for university. The students have to follow physics lessons, but some have more intense scientific or mathematical teaching, depending on the option they have chosen in the curriculum. In our case, physics lessons are composed of theoretical lessons during which traditional teaching is provided by teachers one period a week, and by "practical work" lessons taking place every two weeks for two periods (one hour and a half each). Practical work lessons are an old tradition in this school; for these lessons the classroom is split into two halves (12 students in our case), offering the teacher a better possibility to lead group and experimental work. These lessons take place in a laboratory, well equipped with computers (5 laptops, including one for the teacher, connected by a local net), plugs, and other useful material. The usual activity carried out in these lessons consists in conducting a scientific experiment on a phenomenon or material setting. The experiment is then reported by the group in a paper which must follow a certain template, includes graphics or tables, and is used by teachers to teach the scientific method of using data to justify claims or answers, in addition to more traditional calculations.

Participants
The students (grade 11) were in their second year of high school and physics teaching, and were introduced to the experimental method. The previous year they studied the entire kinematics chapter. As for previous knowledge, it is particularly relevant to mention a lesson on vectors in mathematics they received before working on the Case. Their elected specific options were first "Philosophy, psychology and pedagogy", and for a minority of students "English". They were all familiar with ICT tools, for example, "msn messenger" was very popular in the classroom. The mere term of argumentation was not totally new in physics for them, as they spent one year having to write reports about laboratory work in which the teacher put an emphasis on the argumentative use of

data to support the experimental results. However, the students could not be considered as familiar with argumentation, because despite the teacher's efforts to make them articulate facts as supporting either one theory or another in the experimental reports, they were generally unsuccessful at putting results in an argumentative structure.

The teacher who accepted work on the project was a teacher in training, a young teacher having a part-time teaching position during his training at Teacher training college (Haute Ecole Pédagogique, HEP). At this stage of his studies, a teacher in training is supervised by an older colleague for his teaching (called here a "supervisor"), and by a teacher trainer from HEP for his masters thesis. The teacher in training could use the ESCALATE activities as a frame within which he could write his master thesis on an interesting teaching activity, and show how he benefited from the large amount of time he invested in the collaborative work with the researcher. In addition, he was very interested in the pedagogical approach of the ESCALATE project. Both the teacher and his supervisor were familiar with constructivist pedagogy, and the experimental approach to teaching science has a long tradition in this school. The supervising teacher had tried many approaches, following the educational trends of the last 30 years, and was therefore less interested in the ESCALATE as a resource for renewing practice. Nevertheless, he welcomed the project very positively, as he had been using an inquiry based approach and trying to foster students' argumentative reasoning in his practice for years.

Setting the collaboration
Just after finishing the Microworld design, we started to search for an interested school for implementation, which included succeeding in motivating teachers to participate in this specific task within the ESCALATE approach. It demanded from the researcher a clear discourse about the case possibilities for learning on one hand, and a lot of flexibility on the other hand, to be prepared to adapt to the local context of school and teachers' practices. The researcher first contacted his previous physics teacher. Access to a classroom does not benefit from an institutional structure in Switzerland, as teachers do not get any scheduled time or funding for carrying out activities with researchers. Nevertheless, thanks to the researcher contact, a meeting took place at school, where the researcher presented the ESCALATE project to the three physics teachers in place. The headmaster was informed of the researcher's presence, and participated in the second meeting to welcome him. He gave strong encouragement for this kind of initiative, as he acknowledged the importance and necessity of improving science teaching.

All teachers sounded interested in the project approach using argumentation and inquiry, but they were slightly sceptical with regard to the objectives of enhancing scientific teaching or science attractiveness. They had tried a lot of new pedagogical methods already, and were unsure of the outcomes. In addition, they made it clear that in their work context they could not invest much time in participating. To start with, the teachers invited the researcher to attend some of their lessons using experimentation. Then, the researcher could interview students during the last course before summer holidays. At the start of the new school year, a second meeting took place where the researcher tried to find with the teachers a concrete activity for starting collaboration. Although several possibilities to observe the running activities were offered to the researcher by the teachers, none of the ordinary teachers seemed to have time or enough interest to give any lessons for the ESCALATE implementation. The teachers either had their own way of teaching the concepts involved, or it was not their topic for the year. However, a new teacher in training attending this meeting and working as a teacher in training was very

interested in starting a long term collaboration. Since then, the researcher has only worked with this teacher in training and his classroom, under supervision. The sequence was mainly prepared at this point of the project, a few weeks before the implementation started. It had also been partially designed during the activity as an adaptation to the context of doing or as emerging thinking in interaction.

The collaboration between the researcher and the teacher in training was very open and informal, meaning they could discuss the students' activities design step by step and carry out these activities as they wished without having to report to anybody about it. It is certainly the positive counterpart of not having institutional management of the researcher's access to the classroom. The school context is further described below.

4. Implementation

Sequence
Before starting practical work lessons, the teacher distributed a questionnaire containing 6 items to the students, in order to grasp their preconceptions of different problems in mechanics and for initiating the plot of the sequence. Indeed, students did not receive any answers from the teacher on these 6 problems during the whole sequence, so that they kept them in mind as questions to ask.

Except for some minor changes to the worksheet, the scenario took place as intended by the designers. It lasted longer than expected, because several lessons were dropped from the schedule for extracurricular reasons. All in all, the classroom worked on the *Marbles move* from September to February, with the exception of one or two lessons which addressed related topics.

The scenario took place through the following steps:

1. A questionnaire about preconception, filled out individually without feedback or teaching.
2. Two or three sessions with the Microworld and materials, according to the worksheet activities carried out in small groups, and finalized with a conclusive discussion.
3. An argumentative activity in groups to share and discuss the questionnaire answers on Digalo, through a synchronous session.
4. An experimental activity in groups on the six situations of the questionnaire with real material, leading to an experimental report for each group.
5. Another questionnaire about the same preconceptions filled out individually as an indicator of change.

More precise information, including the worksheets, can be found with the Case description.

After the activity with the Microworld, students' attention was brought back to the questionnaire problems in order to initiate argumentative discussion about them. The teacher planned a Digalo activity for two practical work lessons, where groups of students had to build a classroom shared argumentative map in a maximum of ten minutes per problem. Students were set in the usual small groups, all together in the classroom, with one computer per group. All four computers were linked through a synchronous connection, allowing them to work in real time on the same Digalo map. In the map

settings, one layer was assigned to each question, so that students did not need to change maps to move to the next question, and could freely navigate from one question to another if they needed to. The objective of this activity was to set a two level discussion on preconceptions activated through the questionnaire: first, at the group level, students had to come to an agreement or at least a compromise on one answer for the group on the map; second, at the classroom level, each group's answers were confronted with the others' through the Digalo map. These two levels were supposed to interact with each other, for instance, if a group was contradicted by another one on the argumentative map it could raise doubt within the group and start the discussion again about the right answer to choose within the group. No final answers were given at the end of the activity, because the aim was to set a frame for students to engage in argumentative activity and to justify their answers. If the teacher was assessing or evaluating students' answers, it could stop their commitment into argumentative dialogue as the activity would lose its meaning.

For the last two lessons of the sequence, the teacher planned an experimental activity on the same 6 problems, with a specific material device for each of them. The teacher's objective for this inquiry-based activity was for students to find out the right answer following a scientific and experimental procedure. The researcher had a different objective, which was to compare which knowledge and explanations would emerge from this activity in comparison to argumentative discussion. After the sequence, students filled in again the 6 item questionnaire with slightly modified problems on the same physics questions. They also had one lesson for a plenary discussion, displaying their results of the two questionnaires and explaining the pedagogical approach, the objectives related to ICT tools in the sequence, and teaching complementary physics issues.

Observations
The table below presents the data gathered during the whole sequence. It includes the questionnaires before (number 1) and after (number 2) the sequence, the worksheet filled in by each of the 8 groups of students, and audiovisual records. The teacher's theoretical course given to this class and to another class of the same grade is indicated as data, because it provides information about theoretical knowledge students might use in their practical work lessons.

Data	Type	Level of analysis	Number of students
Questionnaire 1 (6 items)	written	individual	21 +15 from classroom 2
Worksheet for Microworld activity	written	group	24 (4 missing once)
Digalo map (6 items)	written +replay	group (sentence) ½ classroom (map)	24 (2 missing once)
Audio records of the sequence (1 per group)	audio	group	24 (3 missing once) + teacher
Video records of the sequence (1 per ½ classroom)	video	group	2 groups per lesson + teacher
Experimental report on the 6 items	written	group	24 (2 missing once) + teacher

Data	Type	Level of analysis	Number of students
Questionnaire 2 (6 items)	written	individual	20
Theoretical course given in parallel	written	2 classrooms	24 +15 from classroom 2

We only used a small part of these data for the results presented in this report, because more in depth analyses exceeded the short time frame of the project. Nevertheless, they constitute the main data of the researcher's PhD study, which is focusing on construction of knowledge through social interaction and argumentation.

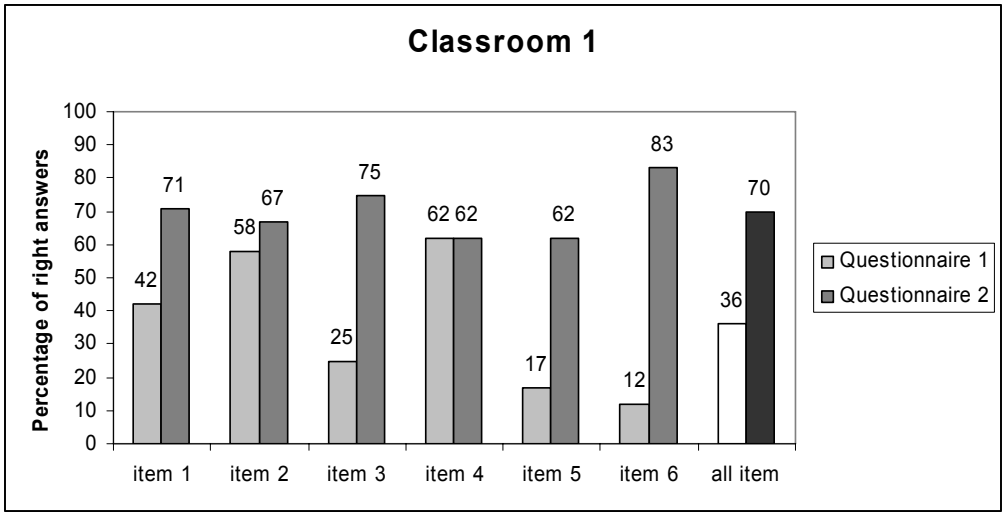
5. Results

Social interaction and commitment to activities
The groups displayed good and often very good participation in discussions, and most of them were focused on the activities. On the other hand, the transition between these rich discussions and the paper and pencil answers on the worksheet was problematic both for learners, who often failed to efficiently conclude their discussion, and for the researcher, who lost most of the richness of the oral discussion content. In addition, often only one student was in charge of playing the role of secretary for the group, which implied a more important loss. We observed that for the one or two groups lacking motivation to engage in discussions about physics, the disadvantage in learning was important, as the whole scenario was based on social interaction to build knowledge and foster understanding. These groups spent much more time idle or speaking about their life out of school than the other groups.

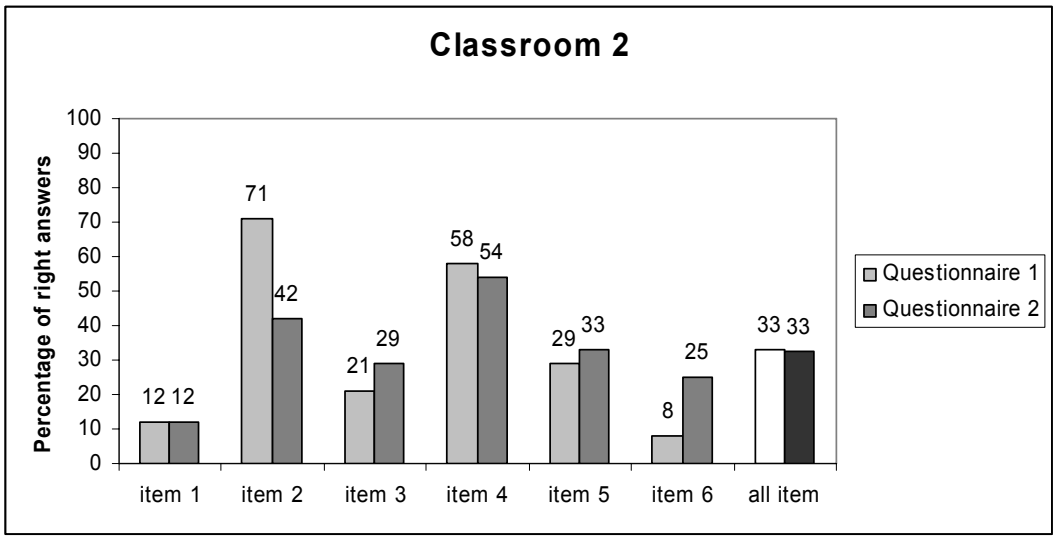
To evaluate the social interaction from the Digalo maps, we observed which kind of resolution strategies occurred when conflicting answers were shared on the map. We found both social resolution of conflicts and social construction of knowledge. The data do not allow us to support the idea that the Digalo tool fosters social construction of knowledge, but it does not hinder it. Digalo maps give an indication of the collective work and argumentative or inquiry moves. In almost all 12 maps, we found several groups justifying their conception of the situation. These justifications were often grounded in visible effects, or previous experience of a similar situation, and therefore can be considered as inferred from inquiry. Nevertheless, some justifications take a normative aspect and seem to come directly from theory, such as a specific law (i.e., "a falling object on earth always has an acceleration rate of 9.81m/s^2"). Most of the Digalo maps also contain one or more interventions challenging another group's point of view, indicating an emerging argumentation. Nevertheless, these starting points of argumentative dialogue mediated by Digalo were not often answered by the groups holding the challenged conception. The dynamic of the dialogue appeared slowed down by the tool.

Preconceptions and learning
The preconception questionnaires filled in by students at the beginning and at the end of the scenario can offer a general indicator evaluating students' learning in terms of transformations of preconceptions in dynamics. The first and the second questionnaire presented the same six situations, highly related to known preconceptions dealing with acceleration and force, under a different presentation. Results show a clear improvement of the percentage of right answers for four of the six problems, and a rather constant

percentage for the other two items. The general percentage of right answers increased from 36% to 70% for all items.



These results indicate that something unusual occurred, as, according to the literature, the students' preconceptions normally do not change at all after six months of formal teaching. However, we need to compare this classroom to another classroom of the same college which also filled in the questionnaires before and after a six month teaching period. Theoretical courses were identical for both classrooms and were given by the same teacher, but the students in the second classroom did not have any practical work lessons. The comparison of the students' results in the second classroom on the first and second questionnaires corresponds to the state of affairs described in the literature in a traditional teaching situation: no change related to preconceptions is indicated. For four items the percentage is more or less similar for both tests, for one item the score notably decreased (item 2) and for the last item the score increased slightly (item 6) (see Figure below). The general percentage of right answers remains the same for the first and second questionnaires, 33% in both cases.



These results bear witness to a positive change in students' conceptions after the *Marbles move* case. However, two classes are never exactly the same and cannot be compared with the same validity as a control group. In addition, these data provide us with a very general evaluation of the ability of the *Marbles move* case to reach students' preconceptions in physics, but it does not provide information about which aspects of the case are responsible for this effect on preconception.

To proceed further in detail with this question, we propose looking more carefully at two items (numbers 1 and 3) of the questionnaire, in order to examine if and how students' answers on the questionnaire are linked to their work on the Microworld activity. This analysis can be done based on group worksheets through the identification of specific tasks on the worksheet which are directly related to the particular preconceptions questioned in items 1 and 3. The comparison of students' answers to the two related problems is grounded on the researcher's choice of a concept or piece of knowledge linking them. Two examples are presented here to illustrate this line of analysis.

Example 1
The questionnaire presented two balls suspended in the air at the same level, one heavy, the other light, and asked the students to decide wherever one is touching the ground before the other when we drop them, if yes which one, and why. The main issue in item 1 concerns the influence of mass on the movement. It is mostly related to an inquiry-based activity: observing the effect of the first variable, the mass, on the other, i.e., velocity or acceleration. This general observation can be made in different conditions; the two relevant conditions selected for our case were either a horizontal or a vertical free movement. The worksheet activity performed with the Microworld consisted of describing the influence of the mass on the movement of the marble rolling down the slope. It remains the same question as on the questionnaire, but presented in a more abstract way. The students were using the Microworld for a direct manipulation of the marble mass with the slide on the screen, and they observed the effect watching the simulation playing and reading the velocity measure. They then had to fill in a table with

the results and draw a conclusion answering the general question of the influence of the mass on each variable.

The table below compares the percentage of answers from the questionnaire's first item corresponding to the classic preconception to the groups' written answers on the worksheet about the question explained above. The answers were classified as "preconception" if they expressed the belief that the mass changes the marble's acceleration or velocity for an object freely falling to the floor. The percentage for the results on students' worksheet is approximate, because these data are gathered at a group level only.

Item 1	**Questionnaire before**	**Results on the worksheet**	**Questionnaire after**
Preconception	58%	about 20%	29%
Right answer	42%	about 80%	71%

The results on the worksheet are particularly good, probably because the activity consists mostly in observing the Microworld. However, these good results can be linked to the noticeable improvement on the second questionnaire for the same issue.

Example 2
Here, the challenge for physics learners is to differentiate Force from Velocity. This confusion can be easily demonstrated by asking the students which forces apply to a ball, when we toss it, at the precise moment the foot is still touching the ball, and when the ball is going up but already left the foot (see SESAMES case for more information). The classic preconception is to consider that there is a force applied to the ball by the foot even when they are not in contact anymore. Item 3 on the questionnaire displays a drawing of this movement in a three picture cartoon. Students had to draw a vector for the force applied by the foot on the ball in each picture. Observing the vectors and their directions we can distinguish between students' confusing the force with the velocity of the ball: the vectors are drawn on each picture and follow the movement direction. The correct answers mentioned only a force applied by the foot on the ball when it is lifting the ball and none when the ball left the foot and is going up. The activity with the Microworld asked students to draw the forces applied to the marbles at the very moment of the collision. The problem is closely related, but in the case of the marbles, the movement is horizontal instead of vertical. The table below shows the percentage of preconception, when force is confused with velocity, and of right answers.

Item 3	**Questionnaire before**	**Results on the worksheet**	**Questionnaire after**
Preconception	75%	about 20%	25%
Right answer with a wrong drawing		about 40%	
Right answer	25%	about 40%	75%

The results show that this problem was slightly more difficult. An intermediate level appears, where students cannot be considered confused by force and velocity: there is no force corresponding to the velocity drawn, but the expected force applied to each marble is inverted. The results from the worksheet and from the second questionnaire display a very similar proportion of preconception, and indicate that the level of understanding reached by the group working on the Microworld task and by individuals at the end of the

sequence is comparable. Even if these results require confirmation from more detailed and qualitative analyses of students' reasoning, we can assume that the sequence generally succeeded in reaching students' preconceptions and made our students work on their first conception in a way that they could use new conceptual tools in individual answers six months later.

The ICT tools in the case
Students were generally motivated to use the Microworld or Digalo technologies, even if they needed quite a long time to learn how to use them for the lesson's purpose (15-30 minutes). The observation of the phenomenon with the materialistic setting or in the Microworld was a real challenge for students. Careful and systematic observation seemed to be very unusual, and the basics of scientific procedure, such as manipulating one variable at a time in order to identify its effects, were far from being obvious. The simulation probably played the role of a much more reliable source of information for students than hands-on experience, as they used it as the unique means of inquiry. Nobody raised doubts on the validity of the model ruling the Microworld.

For students to learn how to use Digalo, the teacher's introduction to the tool was essential. Once students understood how to create a text box and to type their message in it, the discussion was dynamic. In about ten minutes, the four groups filled the screen with a map sharing their answers and initiating a debate. By choosing another "layer" active and visible on the same map, each group was free to go to the next question and/or come back to the previous ones for reading new messages. This advanced use of the layers did not happen often, probably because it was only the first time students had used the tool.

Students' evaluations
Students were asked to share their points of view on the sequence in a plenary discussion in the classroom. It appeared that most students underestimated the actual difficulties of understanding physics concepts in a way they would become able to use them for describing a situation like the marbles one. This fact led them to think they did not need to spend that much time on the *Marbles moves* case. To introduce the final plenary discussion in the classroom, the teacher displayed through beamer projection the Digalo maps produced during the argumentative activity and the quantitative results of the questionnaires. Then, the teacher presented the pedagogical approach used in the case, and explained his work on preconceptions. This presentation restimulated students' motivation towards learning. Six months after the end of the scenario, a short analytical feedback on the research results was given by the researcher, mostly based on Digalo maps. Students showed a real interest in these results.

Researcher and teacher roles
Most of the time the researcher was in the classroom during the lesson (doing the video and audio recording), and he could discuss what had happened with the teacher in training during the lunch break. He played a teacher role for the first lesson, and got the activity started. Thereafter, he only focused on recording, except occasionally giving technical support with digital tools to avoid overloading the teacher.

The supervisor kept an eye on the ongoing activities all the way through and participated briefly by helping to install Digalo on the local server, as he was the most experienced computer user. He asked the researcher to write a paper in the physics teachers' journal

for French speaking Switzerland. The interest displayed by a researcher in social sciences for the teaching of physics was an opportunity for him to send a meaningful message within the local political context. The researcher wrote an article describing the ESCALATE activity, and it was published and disseminated to all physics teachers in the French speaking part of the country.

The teacher in training worked as usual during the practical work lesson. His role consisted of introducing the activity, giving some hints or theoretical recalls, and then in visiting the different groups, one after another. During the group visits, the teacher in training usually repeated what had been said in the introduction, in an interactive way that visibly created a more mutual understanding between the students and him. In the second part of the lesson, the teacher in training was called by the groups in order to answer their questions, or confirm students' answers. In general, the teacher did not offer solutions to students' problems, but requestioned them, guiding them to find out by themselves what the obstacle was. Although it was meant to be the only role for the teacher in the Microworld activity, video and audio records show it was not always the case.

Nevertheless, the use of technology requiring computers took a lot of time and attention from the teacher in training. His usual role of encouragement and assessment of the students' work during the practical lesson was sometimes restricted by this new load of technical work. This is important, as most of the female groups needed a word from the teacher to feel confident to take the next step into activities: they would not take the risk of starting on a wrong basis, and preferred to check their results by asking the teacher. Therefore, the groups were sometimes waiting for the teacher, who was very busy taking care of the technological and learning issues of four groups of students.

6. Lessons Learned

About designing the case and the Microworld
Designing is an interdisciplinary work, for which it is not sufficient just to put together specialists in their own activity field (teacher, physicist and psychologist in the present case). At least one person needs to be at the disciplinary crossroad herself, to ensure a successful communication in the collaborative and complex task of design. Indeed, the design of the sequence should provide a frame for students to engage in the co-construction of a specific set of knowledge, competences, and understanding. To illustrate the critical process of communication in this work, we present here the narrative of a situation which could have led to an impasse in the Microworld design:
The first interactions were between the researcher and the physicist, based on the willingness of the latter to help a young researcher. The physicist was very experienced both in describing a situation, as the *Marbles move*, with domain knowledge and in education through ICT. However, the required equation for the Microworld was not constructed easily. To follow the physicist's explanations, the researcher had to refresh to a high level of understanding his own physics knowledge, grounded in his previous scientific high school degree. Because referring to tables and formulas was certainly insufficient to be able to use the physicist's equation and explain it to the program developer, the researcher studied progressively an on-line physics course.

In the meantime, the dialogue started with the technical team writing the *Marbles move* Microworld in computer language. Graphics and global design were easy to share, but the transmission of the equation for the core of the simulation required an oral discussion

with an intermediate educator and the physicist who possessed the technical language and knew about developing the Microworld, its limits and its possibilities. Besides two short meetings between the educator and the researcher where they shared their understanding of the Microworld design, an intensive email exchange appeared to be necessary later for a problematic dimension: the collision elasticity.

The researcher sent a proposal for dealing with marble elasticity to the technical team and the mediating educator, as a new variable at users' disposal. The basic idea for adding this variable consists of a percentage of momentum getting lost in the marble's deformation during the collision. The collaborators replied, saying there were several ways to put elasticity into a mathematical equation, and asking for the physics theory grounding the proposal. The researcher couldn't answer and needed to call the physicist once more for help, who repeated his previous calculation with a little more detail.

Finally, the researcher understood, while studying the physicist's draft, that a mathematical simplification procedure was almost totally implicit in the physicist's reasoning, and he could then reconstitute the missing steps in the document. The researcher then sent this mathematical demonstration to the technical partner and the mediating educator. Thereafter, mutual understanding was achieved. This means that the real problem in the dialogue concerned proving that the physicist's mathematical approach to elasticity was correctly referring to domain knowledge, and not with managing technical challenges. Finally, the developer could consequently add the variable of elasticity to the Microworld.

About implementing the project objectives
The rich thinking and argumentative content of the groups' discussions does not fit into the actual way of evaluating physics. This was a limitation to our work, as the teacher had to evaluate his students based on the traditional way of teaching, given in parallel, rather than on the time consuming activity he carried out with them. It is a limitation for all teachers and it makes them hesitate to engage in a comparable innovative practice, since they would have to involve a lot of lessons and effort into a none valuated work. In consequence, we claim that it is necessary to develop new ways of evaluating which match the needs of innovative practices . Therefore, we could not provide a serious evaluation of the students' learning in the case without analysing audio and video records.

About using ICT in the classroom
During the activities, once contact is established with the students, it is important to attend the lessons to make sure the teacher and the students know how to use the material, the software, and to be able to notice or even intervene when something does not happen as it was expected to. The designer of activities is the one in charge of acknowledging if the prepared scenario is being implemented the way it was meant to, because the teacher cannot be expected to notice all crucial points of divergence when he has not designed the case. Before the activities start, the technical issues must be prepared: installing the Microworld on the school's computers and putting Digalo into the local net for having synchronous sessions; preparing the material for video and audio recording (which needs students' written authorisations).

About learning objectives
The project timetable was unfortunately too short to implement a sequence using Microworld in the genuine sense described by Papert, as "knowledge incubators". Indeed,

the technological development of *Marbles Move* was reduced to a few months to leave enough time for collaborating with the teacher and carrying out the implementation at school. Therefore, both the Microworld and the sequence design were too short to realize a device offering students the possibility of exploring various models of movement laws. It would have been the case if students could have engaged in changing the Microworld and creating other possible worlds respecting different physical laws than Newton's. To drive the design and implementation process further on this line is certainly an interesting follow up to this ESCALATE case.

The Microworld underlying model should be more explicitly discussed, as it is very easily taken as the truth by students. Rather, having a Microworld at one's disposal should provide an opportunity for learners to understand the roles that scientific models play in physics. The learners should become more aware of how a model works to represent a natural phenomenon. They could then use the Microworld as one model among many, in the frame of which their inquiry takes place. On this basis, the model could be presented all at once as a useful representation for understanding, as a relevant knowledge, and as a simplification and reduction of reality that can be misleading or insufficient in certain situations.

Studying the role played by argumentation in the learning process requires a more detailed work on the audio and video records collected at each step of the sequence.

D.2 Description sommaire d'une leçon typique de Travaux Pratiques

Afin d'aller plus loin dans la description de la culture locale des Travaux Pratiques, nous allons décrire ci-dessous deux visites effectuées pour la même leçon sur l'électricité. L'enseignant qui dispense ces leçons pour la classe 1 est l'enseignant stagiaire avec qui nous avons travaillé, sous la supervision de son formateur en établissement (FEE), qui lui a transmis le plan de leçon. Les leçons de la classe 2 sont dispensées par l'enseignant titulaire de la classe, le formateur en établissement FEE de l'enseignant stagiaire avec qui nous avons collaboré pour Marbles Move. Le sujet de la leçon est l'électricité, plus particulièrement les connexions en série et en parallèle. Les élèves ont déjà eu une leçon sur ce sujet, en cours théorique.

Les observations présentées ci-dessous sont constituées de traces permettant d'esquisser le contexte de l'implémentation du Case Marbles Move. Elles n'ont aucune prétention en tant que données de recherche, et ne sont pas utilisées pour en tirer des résultats de recherche. Cependant, ces quelques traces permettent au lecteur familier des situations d'enseignement de se faire une représentation du contexte de manière un peu impressionniste, de manière à situer les propos de la thèse. Elles permettent aussi de se familiariser avec les enjeux dans la vie de la classe, ce qui fait par exemple qu'un groupe d'élève travaille bien ou peu, et les enjeux de la formation en établissement pour l'enseignant stagiaire, en nous faisant sentir la manière dont l'expérience de l'enseignant donne vie à un dispositif didactique, toujours dans le contexte qui nous concerne et avec les personnes avec qui nous avons collaboré.

Lors de ces observations, j'adopte une position de chercheur légèrement participative, demandant aux élèves de m'expliquer ce qu'ils font, mais sans prendre le rôle d'enseignant sur les contenus. Par exemple, je ne valide ni n'invalide leurs résultats. Par contre, il m'arrive parfois de demander aux élèves d'expliciter leurs actions, lorsqu'ils ne savent pas comment poursuivre et que l'enseignant est occupé ailleurs, les aidant à avancer dans leurs exercices. Cette position m'est venue spontanément du fait d'être dans une classe avec un mode de fonctionnement en petits groupes d'élèves (îlots), dans lequel ma présence ne passe pas inaperçue. Poser des questions permet d'éviter de faire semblant de ne pas être là, de témoigner un intérêt à leurs activités et de détendre l'atmosphère, notamment en désamorçant la pression évaluative que pourrait représenter mon regard de chercheur et mon écoute active.

Une leçon typique de TP avec l'enseignant stagiaire : classe 1

Cette leçon de TP dure deux périodes de quarante-cinq minutes. Neuf élèves sont présents, trois garçons et six filles.

L'enseignant-stagiaire commence par faire une introduction au tableau où il expose "la théorie pour les TP", c'est-à-dire les formules utiles pour les problèmes abordés à l'aide du matériel. Il s'agit notamment de répéter que la résistance totale d'un circuit en série vaut la somme des résistances de chaque élément sur le circuit :

$$R = R_1 + R_2 + ...R_n = \sum_i R_i \tag{D.1}$$

L'enseignant expose la démonstration théorique et demande aux élèves la "démonstration expérimentale", à l'aide de la loi d'Ohm, qui pose l'égalité entre la tension du circuit et le produit de la résistance et de l'intensité du courant ($U = R \cdot I$). L'enseignant précise qu'il s'agit d'un sujet qui fera partie de l'évaluation. Ensuite, toujours en introduction, l'enseignant présente un raisonnement semblable mais exposant cette fois la démonstration théorique de la formule de la combinaison de résistances dans un circuit ayant des connexions en parallèle :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... \frac{1}{R_n} = \sum_i \frac{1}{R_i} \tag{D.2}$$

L'enseignant demande alors aux élèves de faire la démonstration expérimentale de cette formule, ce qui sera leur premier exercice de Travaux Pratiques ce jour-là.

Le discours de l'enseignant est très bien structuré, et s'il demande à la classe des résultats de résolution mathématique, tous les choix sont faits par l'enseignant, que ce soit des choix relatifs à l'analyse de la tâche, ou que ce soit des choix ayant trait à la modélisation (formule pertinente pour la "démonstration"), ou encore concernant la procédure à suivre, qui leur est indiquée précisément. La tâche que les élèves vont mettre en place expérimentalement consiste à construire des circuits électriques à l'aide de fils, fiches et prises, et ampoules exerçant une certaine résistance au courant, et à prendre des mesures à l'aide d'un voltmètre/ampèremètre.

Les élèves se mettent au travail en groupes de deux ou trois sur une table, avec un panier comprenant le matériel pour construire les circuits électriques. Le premier groupe rencontre des difficulté à faire les branchements concordant avec les schémas, et surtout à savoir où il faut brancher le voltmètre, information qui ne figure pas sur les schémas imprimés et distribués aux élèves. Les élèves essayent de regarder le chiffre mesuré par le voltmètre pour voir s'il est branché au bon endroit, en le comparant avec le chiffre qu'ils devraient trouver pour "démontrer" l'équation D.2.

Un autre groupe est arrivé au résultat expérimental après dix minutes de travail, procédant à diverses mesures successives. Les élèves attendent l'enseignant pour la suite, déclarant : "ça paraît trop facile, ça doit être faux ce qu'on a fait". Elles ne veulent pas continuer avant d'avoir reçu confirmation de l'enseignant. J'interviens[665] alors et leur demande si leur résultat démontre quelque chose. Elles me répondent que non. Je demande ce qui manque, elles me répondent "une résistance qui vaut R équivalent". Elles ne disposent pas d'une telle résistance dans leur matériel. "Il doit y avoir un autre moyen alors" fais-je remarquer, et elles répliquent "Oui, calculer avec les résistances du circuit R équivalent". Le calcul leur permet de vérifier leur résultat, et il y a une certaine émotion dans le groupe du fait qu'elles soient parvenues toutes seules à la solution. Cependant, elles ne croient pas encore avoir réussi l'exercice, malgré la vérification numérique effectuée, et appellent l'enseignant pour qu'il confirme l'exactitude de leur démarche. Ce qu'il fait, et il

665. Je ne souhaitais pas intervenir, étant venu pour une visite de l'activité ; cependant, au vu et au su de ce qui se déroulait sous mes yeux j'ai jugé à ce moment-là qu'il n'était pas éthique de rester les bras ballants alors que je pouvais tenter un étayage leur permettant de trouver la solution par elles-mêmes - ce qui m'a permis de vérifier *in situ* mon hypothèse quant au fait que ce groupe de filles était tout à fait capable de réussir sans l'intervention de l'enseignant. Suite à cette intervention, j'ai défini ma participation de chercheur comme légèrement active, mais en aucun cas évaluative.

leur donne alors l'exercice suivant, consistant à réaliser un circuit mixte, avec des ampoules en série et d'autres en parallèle.

Un troisième groupe est perdu dans les branchements, tentant de mesurer un circuit mixte. Les filles sont bloquées parce qu'elles mesurent I=0.33 pour l'intensité totale, qui devrait valoir la somme de I_1 et I_2, mesuré respectivement I_1=0.32 et I_2=0. L'inégalité entre 0.33 et 0.32 est interprétée par le groupe comme le fait de s'être trompé de procédure. Or, quand l'enseignant intervient, il leur explique qu'une différence de 0.01 est "normale", c'est-à-dire qu'il s'agit d'une imprécision du voltmètre qui s'explique notamment du fait que I_2 est très proche de 0. L'enseignant autorise les filles à écrire 0.01 pour la mesure de I_2 même si l'appareil affiche 0.

Un quatrième groupe a complètement interrompu son travail, et est en train de réviser un cours de psychologie. Leur appareil de dispensation du courant n'arrive plus au-delà de 2 volts, alors que l'exercice a été planifié pour une tension de 4 volts. Les élèves pensent avoir provoqué un court-circuit et endommagé leur appareil. Leur circuit semble branché correctement, mais le problème technique les a décidé d'arrêter de travailler. Une élève d'un autre groupe, qui entend qu'elles ont ce problème suite à mes questions, vient vers le groupe et modifie le branchement d'un des appareils de mesure connectés au circuit. Elle explique qu'elle a eu la même difficulté, et qu'elle en a déduit qu'avec deux voltmètres branchés sur le même circuit, le courant ne passe plus comme il faut [666].

Le premier groupe est toujours se demander où il faut brancher l'appareil de mesure, vers la fin de la leçon de Travaux Pratiques. Ces élèves ont eu énormément de difficultés à brancher le circuit correctement. Sur le schéma on a des lignes qui se croisent sur les fils, avant ou après les résistances, alors que leur matériel leur donnent des bornes pour brancher le voltmètre à l'entrée et la sortie des résistances, sur celles-ci. Visiblement insatisfait avec leur solution actuelle, qui effectivement consiste en une erreur de branchement pour l'une des deux bornes du voltmètre, un des élèves prend subitement la fiche et la branche au bon endroit, en déclarant : "ça veut rien dire ce que je fais". Les élèves observent alors le changement de mesure sur le voltmètre, et découvrent qu'il s'agit de la mesure attendue.

D'une manière générale, l'activité suscite l'intérêt des élèves : deux groupes sur les quatre continuent de travailler pendant la pause, sans s'interrompre. Cependant, malgré cet intérêt, il y a de nombreux temps morts, où les élèves attendent. L'enseignant passe dans chaque groupe et reprend systématiquement son exposé d'introduction dans chaque groupe. Les interactions entre pairs sont nombreuses, et opposent par moment des avis différents, mais pas tant sur des contenus conceptuels : le plus souvent, ils argumentent sur la manière de brancher les fils aux appareils. Le concept de branchement "en série" ne semble pas facile pour les élèves. L'enseignant demande à un moment donné à un-e élève : "en série par rapport à quoi ?" De la discussion qui s'ensuit, il apparaît que certains élèves comprennent être en série comme une propriété absolue du circuit ou de ses composants, plutôt qu'une relation entre deux appareils. En conséquence, ces élèves peinent à placer l'appareil de mesure relativement à la pile, par exemple. Concernant l'approche

666. En effet, même s'il n'est pas conceptualisé de cette manière sur le schéma et dans l'expérience préparée, l'appareil de mesure fonctionne également comme une résistance.

pédagogique des Travaux Pratiques, j'ai en premier lieu eu l'impression d'une approche constructiviste du fait que les groupes travaillent en premier avec le matériel concret, à savoir ils effectuent les branchements et prennent les mesures. Cependant, à y regarder de plus près, la démarche est directive sur les étapes de la procédure à suivre, et laisse les élèves se débrouiller pour réussir, exception faite des interventions de l'enseignant dans les groupes. Ces interventions visent principalement à s'assurer que les consignes sur la procédure ont bien été comprises. Or, il me semble que c'est plutôt un étayage à partir des initiatives des élèves quant à la procédure à suivre qui consiste un élément essentiel d'une pédagogie constructiviste [667]. Nous verrons que l'enseignant titulaire, qui a conçu cette leçon, va effectivement laisser les élèves libres sur la procédure à suivre, et ne l'inscrit pas dans une logique de "démonstration".

Une leçon typique de TP avec l'enseignant titulaire et formateur FEE : classe 2

Cette leçon de Travaux Pratiques dure deux périodes de quarante-cinq minutes. Six élèves sont présents, deux garçons et quatre filles.

L'enseignant introduit les Travaux Pratiques en déclarant qu'il s'agit de situations-problème. Il explique la méthode, notamment en justifiant le fait qu'il n'y a pas de procédure à suivre décrite dans la donnée. Ensuite, l'enseignant fait un rappel dialogué sur les connaissances théoriques du domaine, c'est-à-dire essentiellement sur le vocabulaire : qu'est-ce qu'une résistance, un circuit, la loi d'Ohm, comment procède-t-on pour mesurer ? Les concepts introduits au cours théorique sont simplement rappelés, réactivés, mais aucune définition formelle n'est donnée, l'enseignant faisant plutôt des allusions, par exemple : "vous savez ce que c'est que. . . ". De cette manière, il indique les outils de pensée pertinents pour la tâche. L'enseignant énonce également les conventions qui doivent être utilisées, par exemple qu'il est nécessaire d'indicer les résistances, R_1 R_2 R_3, le courant I_1 I_2 I_3, et la tension U à la borne du générateur, U_1 U_2 et U_3. En fait, il s'agit de bien plus que de transmettre des conventions arbitraires, même si cela en fait partie, car ces conventions sont porteuses de savoirs-faire et d'un cadrage théorique. Par exemple, le fait d'indicer les mesures suggère où elles doivent être effectuées sur le circuit, un savoir-faire essentiel pour réussir l'exercice comme nous l'avons vu à l'occasion des leçons avec la classe 1, et cadre le problème du point de vue théorique comme une comparaison de ces mesures : sont-elles identiques ou non ?

La consigne elle-même est d'associer de toutes les façons possibles les trois résistances à disposition dans le circuit électrique, mais une simple permutation de deux éléments n'est pas considéré comme un changement de branchement du circuit. Il n'est donc pas demandé aux élèves d'intervertir les positions des résistances dans le circuit, notamment parce que c'est trop long et que cela n'amène rien de nouveau relativement aux objectifs d'apprentissage. A chaque fois que les élèves auront trouvé une nouvelle manière de brancher leur circuit, il leur est demandé de mesurer le courant et la tension en divers points du

667. Nous n'impliquons nullement avec cette remarque qu'il *faudrait* avoir une pédagogie constructiviste, mais visons simplement à relever dans cet exemple qu'un plan de leçon construit pour une telle approche ne suffit pas à un enseignant qui débute dans la profession réussisse à implémenter cette approche ; il s'agit donc de souligner le rôle crucial de l'expérience en situation réelle en complément de la manière dont un plan de leçon est conçu.

circuit, afin d'expliquer en fin d'exercice comment ces variables se comportent [668]. Il faut ensuite réfléchir aux lois régissant le courant et la tension. L'enseignant précise encore aux élèves qu'ils ne risquent pas d'endommager le matériel, le générateur étant protégé contre les courts-circuits.

Les élèves se mettent au travail en petits groupes, et l'enseignant commence par passer dans chaque groupe pour les aider à s'approprier l'utilisation du matériel, notamment l'appareil de mesure qui peut être utilisé à la fois comme un voltmètre et un ampèremètre. L'enseignant leur explique également comment dessiner les circuits électriques, ce qui comprend des conventions que les élèves ne respectent pas toujours. Lors de ces visites des groupes, c'est aussi l'occasion pour l'enseignant de découvrir qu'un câble ne fonctionne pas.

Par la suite, l'enseignant est principalement occupé à intervenir en réponse aux problèmes des élèves. Par exemple, certains ne savent pas où planter les bornes du voltmètre/ampèremètre par rapport au circuit, malgré les schémas reçus de l'enseignant, où l'appareil de mesure n'apparaît justement pas. Afin de répondre à cette question, l'enseignant utilise des analogies : l'analogie bien connue de la rivière lui permet de dire que pour mesurer le courant (U) avec le voltmètre il faut détourner le courant pour pouvoir mesurer le débit, c'est-à-dire compter les électrons qui passent, en le faisant passer par l'appareil de mesure, alors que la mesure de l'intensité (I) à l'aide de ampèremètre est comme une mesure de la dénivellation de la rivière, qui nécessite une mesure à chacune des deux extrémités du circuit, sans avoir à débrancher les fils pour faire passer le courant par l'appareil de mesure. Cependant, en présentant cette analogie, l'enseignant met en garde ses élèves contre le fait que l'analogie est trompeuse. Les élèves ne semblent pas tellement s'intéresser à cette mise en garde, et paraissent plutôt se réjouir d'avoir un moyen de se représenter ce qu'ils sont en train de faire. L'enseignant utilise également l'analogie de la mesure du poids en kilogrammes pour justifier la convention arbitraire de ne pas dessiner l'appareil de mesure sur le circuit, tout comme on ne dessine pas de balance quand on parle de poids. Les élèves semblent pouvoir immédiatement s'approprier ces analogies et les utilisent pour réfléchir à leur problème de branchements et de mesures.

Un groupe arrive au premier résultat de leurs expérimentations après une demi-heure de travail. Les élèves comprennent que le courant est le même partout dans leur circuit en série, mais elles ne semblent pas se rendre compte qu'il s'agit là d'un résultat important. L'enseignant discute avec le groupe et me fait part de son hypothèse : ce résultat ne semble peut-être pas important aux élèves du fait qu'il s'agit d'une observation où les mesures donnent des résultats *identiques*, alors que si les élèves avaient trouvé une *différence*, celle-ci leur aurait parue signifiante. L'enseignant tente de leur faire comprendre en quoi c'est un résultat pertinent, mais n'obtient pas tellement de répondant. Les élèves auraient-ils manqué de se poser la question à laquelle leur résultat répond ?

Un deuxième groupe a trouvé à l'aide d'une série de mesures que $U_1{=}U_2{=}U_3$ dans un circuit en parallèle, alors que l'intensité (I) varie. Les élèves cherchent une résistance de 14,3 ohm qui n'est matériellement pas à disposition, appellent l'enseignant et dans le dialogue qui s'ensuit ils proposent une solution, qui consiste

668. Dans ce cas, l'approche pédagogique est réellement inductive, conformément au courant constructiviste (pour une définition de ce terme comme approche pédagogique, et son origine en psychologie, voir p.ex. : Astolfi, 1992/2004, 2008).

à vérifier par le calcul théorique et les mesures faites à l'aide des trois résistances dont ils disposent si la résistance de l'ensemble vaut effectivement 14,3 ohm. L'enseignant leur épargne de faire le calcul, déclarant qu'ils ont compris de quoi il s'agit.

Au cours de la deuxième période des Travaux Pratiques, un groupe a construit un circuit avec des branchements mixtes, en série et en parallèle, et les élèves se sentent bloqués face à la complexité des entrecroisements de fils qu'ils ont branchés. Les élèves ne savent plus s'il respecte la règle de base consistant à mener le courant d'une borne du générateur à l'autre : elles appellent l'enseignant qui vérifie leur circuit et confirme qu'il est correct.

En discutant avec l'enseignant, un autre groupe avoue avoir *calculé* les tensions et intensités du courant aux divers endroits de leur circuit, au lieu de les *mesurées*. Les élèves semblent utiliser les termes *mesurer* et *calculer* indistinctement dans la conversation avec l'enseignant. Leur stratégie fonctionne et permet d'atteindre le résultat escompté avec des circuits uniquement en série ou uniquement en parallèle, mais pour un circuit mixte tel qu'il est demandé dans le dernier exercice de la leçon, cette stratégie échoue. En effet, ne disposant pas de savoirs théoriques sur la manière d'articuler les deux types de branchement, les élèves ne peuvent pas éviter de procéder aux mesures : ils ne savent pas faire le calcul qui les remplacerait. Elles sont alors interrompues dans leur travail, ne savent plus comment poursuivre, et appellent l'enseignant à l'aide.

Le troisième groupe parvient à comprendre en conversation avec l'enseignant, portant notamment sur le 0.01 volt manquant lors de la mesure, que dans son circuit mixte la partie parallèle se comporte comme un circuit parallèle ordinaire, et la partie série comme un circuit série ordinaire, et que les deux parties du circuit forment ensemble un circuit en parallèle. Ils peuvent alors retrouver une équivalence entre le calcul selon la loi d'Ohm et les propriétés d'un circuit parallèle, où la tension est constante tout au long du circuit alors que les intensités des deux parties s'additionnent. Le groupe rédige, en conclusion de cette conversation, la formule suivante dans leur carnet de note, où I est l'intensité mesurée aux bornes du générateur :

$$I_1 + I_3 = I \quad I_2 + I_3 = I \tag{D.3}$$

Ainsi, la rédaction de l'équation D.3, valide pour un circuit mixte, matérialise le résultat de la réflexion sur ce problème effectuée en dialogue avec l'enseignant. C'est l'élément que les élèves saisissent en gardant un trace écrite. Néanmoins, si nous cherchions à décrire en quoi consiste l'apprentissage de ces élèves dans cet exercice et dans la conversation avec leur enseignant, ce qu'ils ont acquis et qui ne leur était pas donné ou expliqué par avance, consiste plutôt en une démarche d'analyse du circuit mixte. Cette démarche leur permet de décomposer le circuit mixte en deux sous-circuits, l'un en parallèle, l'autre en série, eux-mêmes branchés comme un circuit en parallèle. A partir de cette analyse, les savoirs et savoirs-faire des élèves, acquis et mobilisés dans les exercices précédents, leur suffisent pour résoudre le problème du circuit le plus complexe.

Pour terminer, voici quelques observations générales sur le rôle de l'enseignant au cours des Travaux Pratiques de la classe 2. L'enseignant circule de groupe en groupe en posant des questions pour faire réfléchir les élèves. Cette pratique semble jouer un rôle essentiel pour l'efficacité du travail des élèves, dans le sens où les activités des élèves déboucheraient fréquemment et parfois assez rapidement après le début de la leçon, sur des temps morts, sans ces visites de l'enseignant dans les groupes. En effet, les élèves ne savent souvent pas comment poursuivre l'activité, parfois simplement parce qu'ils ne sont pas sûrs de l'exactitude de leurs résultats et en conséquence ne souhaitent pas prendre le risque de continuer, c'est-à-dire de s'engager sur une fausse piste. L'enjeu, dans ce cas, semble être d'éviter le travail inutile, ou un manque de confiance en soi. Par ailleurs, le questionnement de l'enseignant lors des visites dans les groupes est également essentiel pour éviter que les exercices et les consignes, aussi bien rédigées soient-elles, ne débouchent sur une activité des élèves qui n'est que le pastiche de la transposition didactique voulue : une sorte de recherche des chiffres adéquats sur l'appareil de mesure, en cherchant avec les mains le branchement à succès, sans aucun réflexion sur la question de savoir ce que cela signifie du point de vue de la modélisation de l'électricité fournie par la loi d'Ohm, par exemple, ou même sur la question de pourquoi tel ou tel branchement est adéquat. Des élèves effectuant l'activité dans une démarche strictement d'essais et erreurs ne bénéficieraient effectivement pas des apprentissages que le milieu rend possibles, à condition d'un engagement cognitif actif dans les multiples rapports entre le circuit réel construit par les élèves, les schémas fournis, et les lois pour la modélisation mathématiques.

Plusieurs élèves sont pris par des confusions sur les unités de mesure, par exemple entre les *millivolts* affichés sur l'appareil et les *volts* utilisés dans la formule de la loi d'Ohm, ou entre l'unité de mesure de la *tension* et celle de *l'intensité*.

L'enseignant a présenté le courant dans une leçon de théorie antérieure avec une allégorie, celle du chaperon rouge : le loup qui poursuit le chaperon rouge le long des fils. Cette allégorie a pour objectif de donner aux élèves, qui peinent à se représenter le courant électrique, l'image de deux électrons qui se suivent sur la même trajectoire. L'enseignant rappelle régulièrement cette image aux élèves au moment où il leur pose des questions et qu'ils ne parviennent pas à y réfléchir.

Synthèse

Ainsi, la brève description du style d'enseignement des Travaux Pratiques du gymnase dans lequel la recherche a eu lieu permet d'en conclure qu'il s'agit d'une style d'enseignement habituel dans cette région du monde, semblable à ce qui est décrit dans la littérature pour l'enseignement de la physique en Allemagne et en Suisse allemande (voir p.ex. : Seidel & Prenzel, 2006).

De plus, il peut être utile de souligner que dans le contrat didactique spécifique à la classe étudiée, identifier la formule mathématique adéquate tient lieu de solution du problème dans la plupart des exercices, identification qui se fait exclusivement à partir d'un formulaire que les élèves sont tenus de toujours avoir avec eux. L'enseignant aura pris soin de faire ajouter une ou deux formules qui ne sont pas présentes dans le formulaire, sachant que ce qui ne s'y trouve pas ne peut être exigé de ses élèves. Le formulaire est un

condensé très complet de mathématiques, physique et chimie présentant, pour la mécanique, des formules algébriques et vectorielles.

Ainsi, les exercices habituels sont différents de ceux des questionnaires conçus par l'enseignant, notamment en ce que les élèves ne doivent généralement pas partir d'une question de physique qualitative mais plutôt de données numériques et d'un schéma, c'est-à-dire des "exercices d'application".

Selon la littérature, cependant, partir d'énoncé verbaux devrait plutôt faciliter la tâche des élèves (Dee-Lucas & Larkin, 1991). Le microworld - utilisé comme un simulateur - et la séquence d'exercices Marbles Move changent également les activités des élèves (sur ce point, voir par exemple White, 1984 pour un dispositif très semblable). Par ailleurs, le lien entre l'interprétation d'un problème - et donc d'une consigne sous forme qualitative - et la résolution mathématique de celui-ci fait partie de l'objectif des Travaux Pratiques, durant lesquels ils doivent écrire un rapport qui explique ce lien. En ce sens, la séquence Marble Move s'intègre bien dans la culture de la classe, au moins du point de vue des enseignants, puisqu'elle adresse les objectifs de ces derniers. Cependant, dans les habitudes de cet établissement, le lien à expliquer se fait entre les mesures recueillies et la modélisation mathématique soit-disant "à vérifier" - quand bien même les élèves savent bien qu'elle est bonne puisque l'enseignant l'a distribuée - plutôt qu'au moment de l'interprétation de la consigne. En conséquence, la modélisation est généralement effectuée par les enseignants, et le travail des élèves se limite, au mieux, à la comprendre et, au pire, à prendre des mesures et effectuer des calculs (sans comprendre).

Driver et al. (1985) ont signalé que la physique qualitative constituait une bonne alternative à un enseignement où la résolution mathématique est devenu l'unique point d'intérêt [669] :

> *When the precise mathematical formulations of mechanics are the sole focus of teaching, rote-learning of formulae often replaces understanding of concepts. One obvious strategy to prevent this is to teach physics without numbers, at least in the early parts of a sequence of teaching. (...) Qualitative problems similarly focus on concepts and the relationships between concepts (...)*
>
> *One obvious source of observations for discussion is practical work. But again, the perspective we are arguing suggests practical work of a different form. It is not experiments to "verify" Newton's Second Law of Motion which fit the purpose, it is experiments which give rise to observations which challenge aspects of common pre-instruction views. Further, if it is interpretations of the real world we wish to challenge, then there is an argument for using real world materials rather than specialized laboratory apparatus.*
>
> *(Driver et al., 1985, pp. 101-102)*

Cette citation relève l'opportunité des Travaux Pratiques pour l'observation des chercheurs, et l'importance d'une approche pédagogique différente des habitudes brièvement décrites ci-dessus, et largement répandues dans les pays occidentaux à la fin du $XX^{ème}$ siècle : plutôt que de viser à "démontrer" des lois qui condensent la modélisation mathématique effectuées en physique, c'est plutôt les tentatives de

669. Ce qui, d'ailleurs, est facilement le cas *du point de vue des élèves* et notamment en conséquence au fait que réussir la partie mathématique du problème leur garantit une bonne note, alors que l'enseignant s'intéresse bien évidemment à d'autres dimensions de la physique.

modélisation des élèves eux-mêmes qu'il faut viser, par la pratique en classe. Cette "nouvelle" manière de procéder, néanmoins, requiert une observation fine du rapport de la pensée des élèves au langage, médiateur de la compréhension des concepts, dont cette recherche s'est donnée pour but de montrer l'importance jusque dans les plus petits détails, à travers l'étude de *situations de malentendu*.

D.3 Compléments aux analyses de traces

D.3.1 Compléments aux analyses *a posteriori* (ingénierie didactique)

D.3.1.1 Synthèse des analyses d'intervalles temporels par type d'activité pour chaque groupe d'élève.

Le graphe (figure D.1 ci-dessous), produit par le logiciel *Transana*, représente la durée des activités à partir du codage des enregistrements audio et vidéo de la séquence A (séquence "02" ci-dessous). Les lettres indiquées dans les noms de fichier font référence aux élèves (voir la légende présentée sur le tableau 4.5, p. 314) : il y a donc plusieurs codages pour une même leçon, prenant à chaque fois le point de vue du groupe d'élèves enregistré.

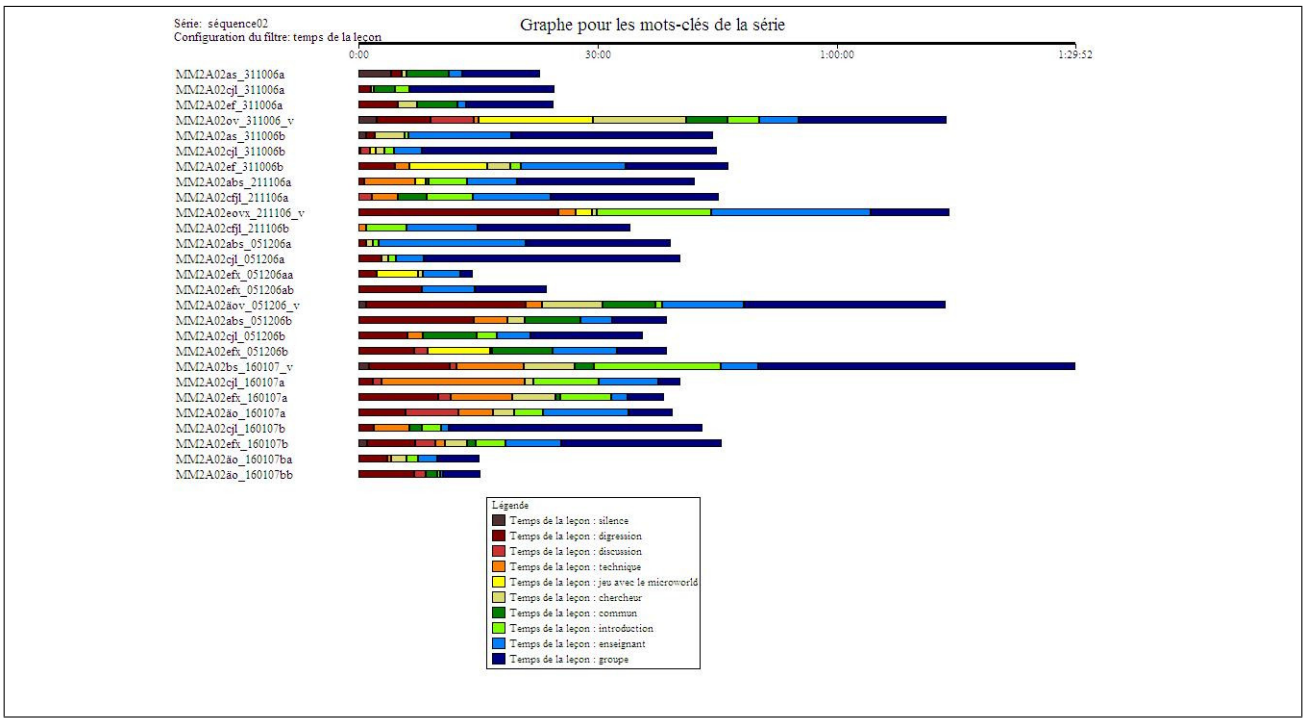


FIGURE D.1 – Durées des diverses activités des groupes d'élèves au fil des leçons de la séquence A, par fichier audio ou vidéo.

Le graphe (figure D.2 ci-dessous), produit par le logiciel *Transana*, représente la durée des activités à partir du codage des enregistrements audio et vidéo de la séquence B (séquence "03" ci-dessous).

Ces deux graphes représentent une synthèse du codage original [670] des leçons, effectuée indépendamment pour chaque groupe d'élèves (lorsque les enregistrements audio ou vidéo existent) en prenant en compte leur activité de groupe (voir section D.3.1.2 ci-dessous). Les critères de codage sont présentés ci-dessous :

670. Les catégories initiales du codage "silence", "discussion" et "digression" ont été fusionnées en une seule par soucis de simplification, de même que les catégories "technique" et "jeu". En outre, les intervalles de "discussions avec le chercheur" n'apparaissent pas sur ce graphe car cette catégorie représente moins de 1% du temps total.

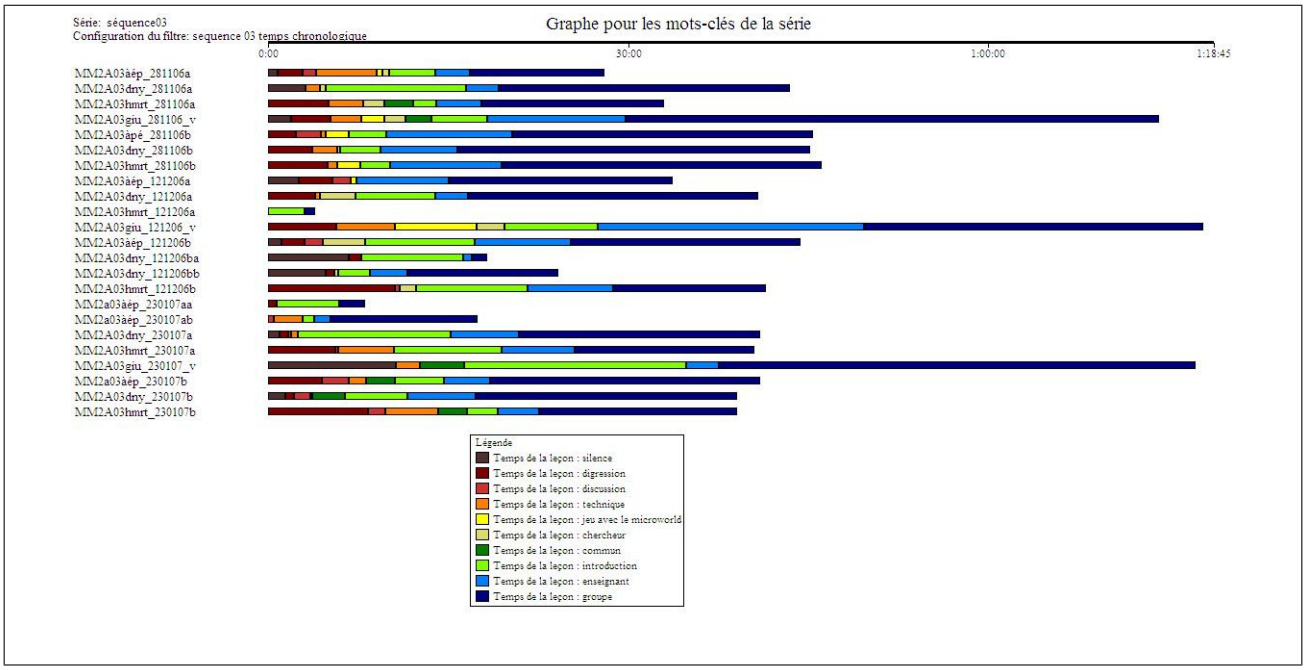


FIGURE D.2 – Durées des diverses activités des groupes d'élèves au fil des leçons de la séquence B, par fichier audio ou vidéo.

introduction : ce sont les moments d'enseignement frontal de l'enseignant, pour autant que l'enregistrement sonore du groupe des élèves ne permette pas d'identifier une conversation entre pairs, partant du principe que si les élèves sont silencieux ils écoutent le discours de l'enseignant ;

commun : ce sont les moments interactifs ou dialogués en classe plénière ;

enseignant : ce sont les moments d'échange avec l'enseignant, lorsque celui-ci est en interaction avec le groupe ou au moins l'un des élèves du groupe ;

chercheur : ce sont les moments d'échange avec le chercheur [671], lorsque celui-ci est en interaction avec le groupe ou au moins l'un des élèves du groupe ;

groupe : ce sont les moments de discussion entre pairs au sein du groupe ou de travail avec discussion intermittente, peu importe qu'il y ait un seule ou plusieurs élèves qui prennent la parole ;

jeu : ce sont les moments passés par le groupe ou l'un de ses membres à jouer ou explorer les outils numériques (*Digalo*, *Mables Move*) ;

technique : ce sont les moments passés à attendre ou régler des problèmes techniques ;

discussion : ce sont les moments passés à discuter avec les groupes voisins, entre pairs ;

digression : ce sont les moments passés par le groupe d'élèves à discuter entre eux ou avec d'autres pairs sur des sujets n'ayant rien à voir avec la leçon de physique ;

silence : ce sont les moments de silence supérieurs à 60 secondes et qui n'ont pas permis d'identifier l'activité des élèves, pendant lesquels l'enseignant n'adresse pas non plus un discours à toute la classe.

671. Le chercheur n'avait pas l'intention de communiquer avec les élèves, mais il a néanmoins répondu aux sollicitations et offert un soutien pour les problèmes techniques sur les outils *Digalo* et *Mables Move*.

D.3.1.2 Graphes des intervalles temporels par type d'activité pour chaque groupe d'élève.

Les figures D.3 à D.52 (ci-dessous) présentent tous les graphes produits avec le logiciel *Transana*, dans l'ordre chronologique des leçons et pour chaque groupe d'élèves. Le tableau 4.2 (p. 306) permet de situer les leçons dans la séquence effective. Les noms des fichiers d'enregistrement audio et vidéo indiqués sur les figures font référence aux élèves présents dans les groupes à l'aide des abréviations par lettre (voir tableau 4.5, p. 314). Pour des raisons techniques, il y a parfois plusieurs fichiers pour une même leçon. Les intervalles sont présentés en durée effective, au format "*minutes* : *secondes*".

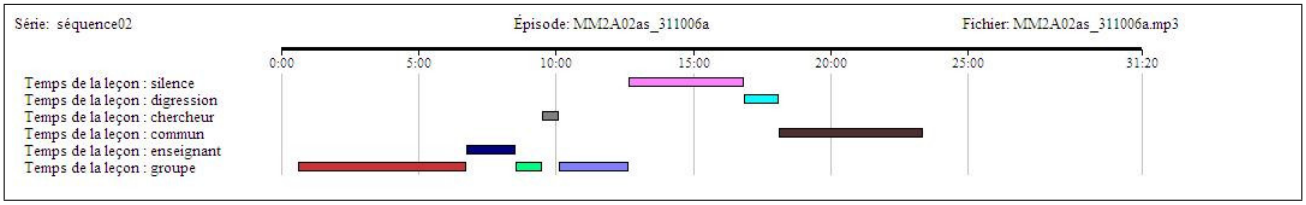


FIGURE D.3 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Aurélie & Sylvie.

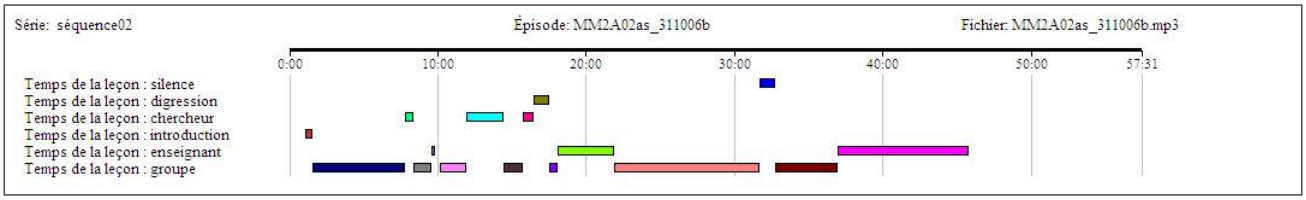


FIGURE D.4 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Aurélie & Sylvie.

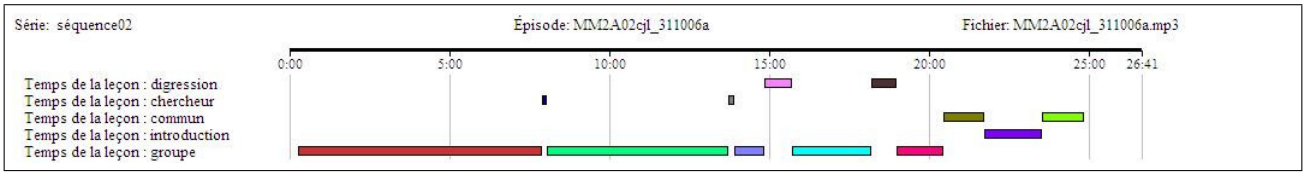


FIGURE D.5 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie.

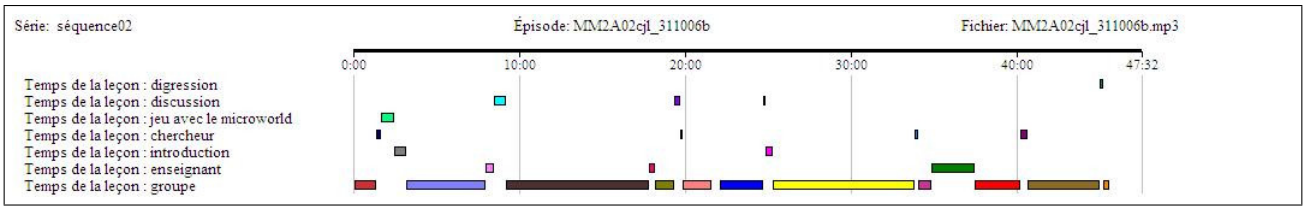


FIGURE D.6 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie.

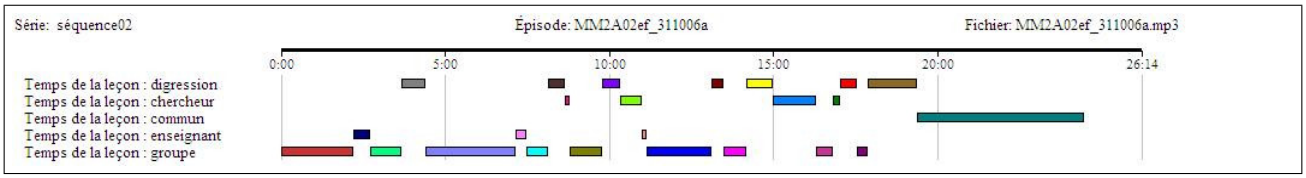


FIGURE D.7 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Ernest & Ferdinand.

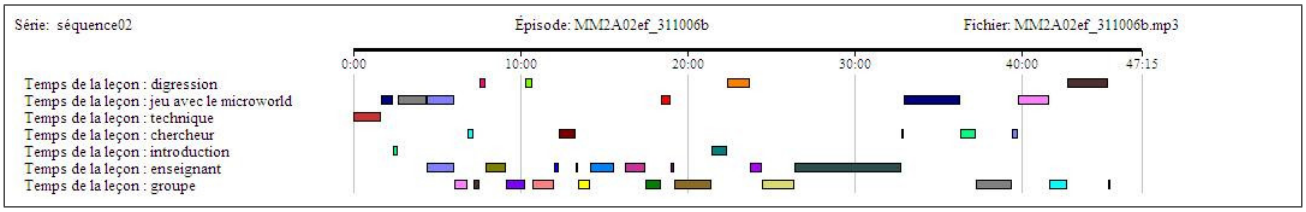


FIGURE D.8 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Ernest & Ferdinand.

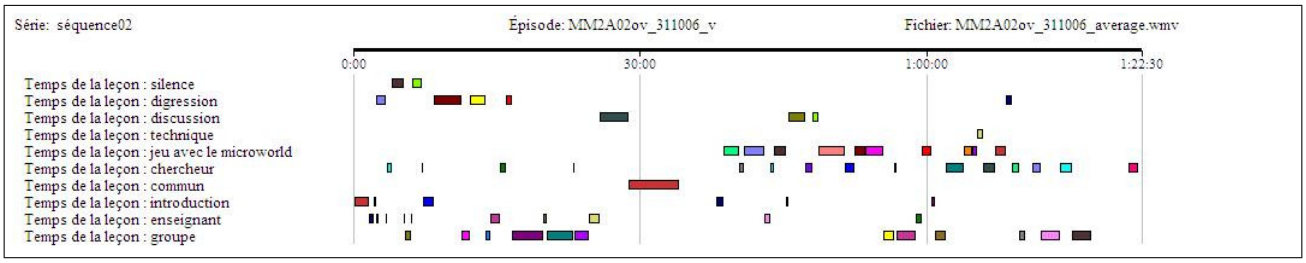


FIGURE D.9 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 31 octobre (séquence A) pour le groupe Ophélie & Victor.

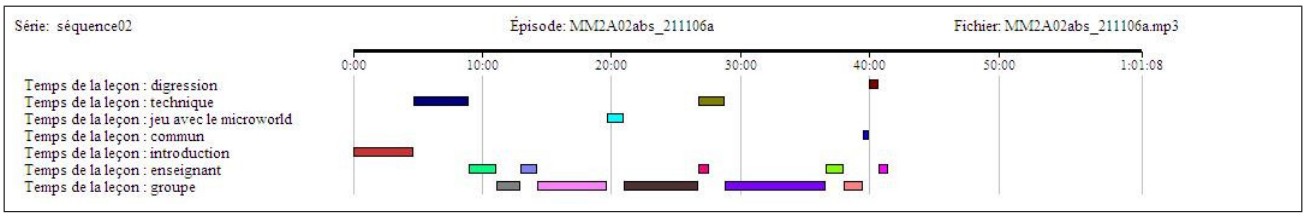


FIGURE D.10 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Aurélie, Barbara & Sylvie.

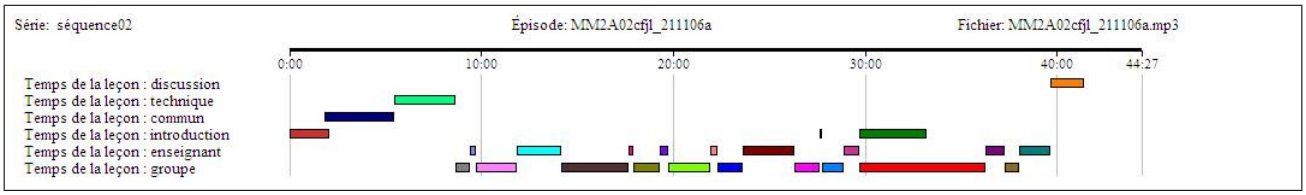


FIGURE D.11 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Ferdinand, Julianne & Laurie.

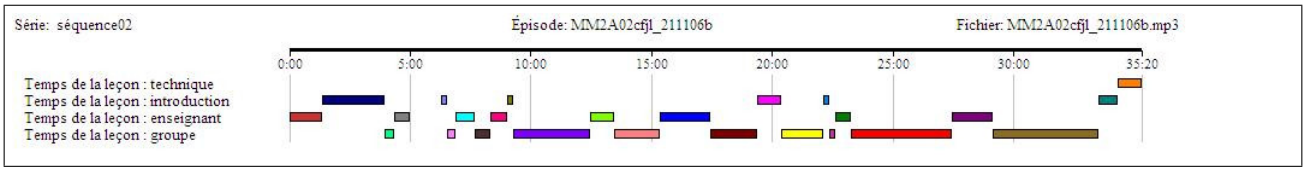


FIGURE D.12 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Ferdinand, Julianne & Laurie.

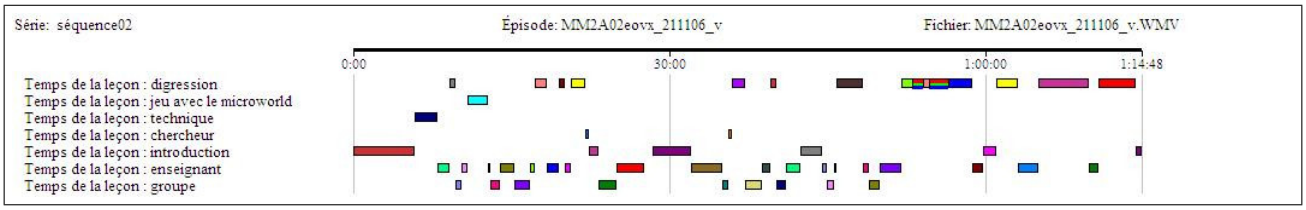


FIGURE D.13 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 21 novembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ophélie, Victor & Xavier.

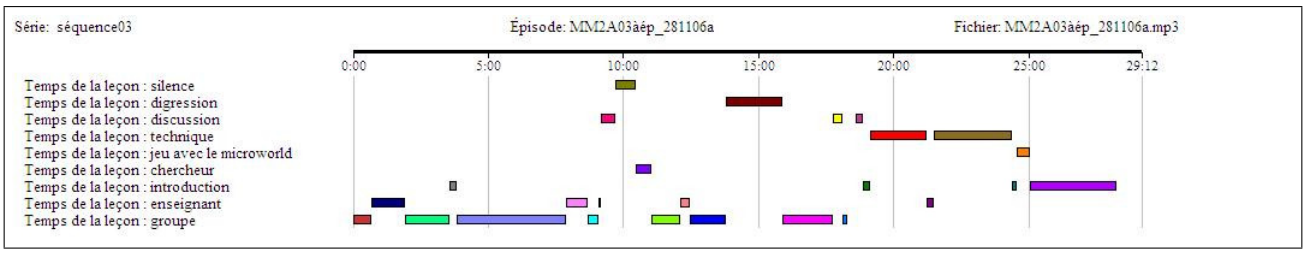


FIGURE D.14 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette.

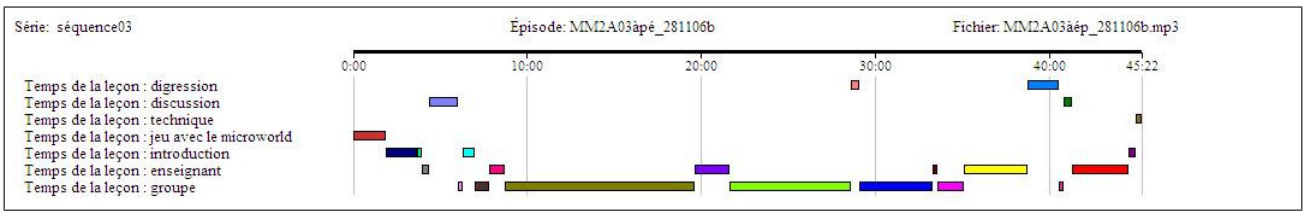


FIGURE D.15 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette.

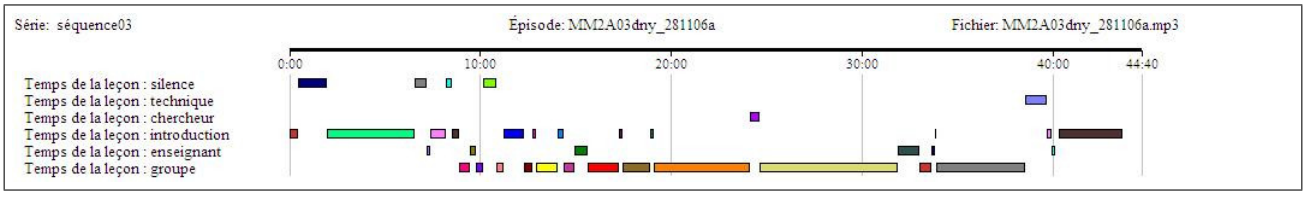


FIGURE D.16 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves.

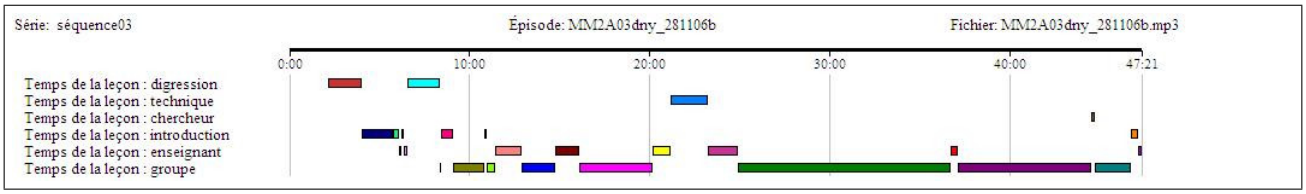


FIGURE D.17 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves.

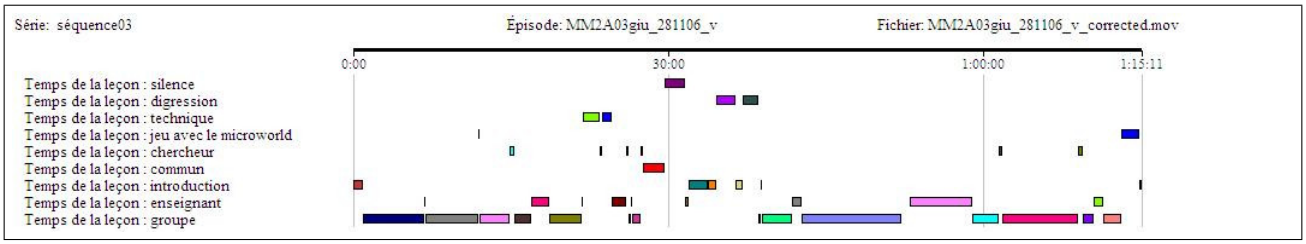


FIGURE D.18 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Germaine, Ilona & Urs.

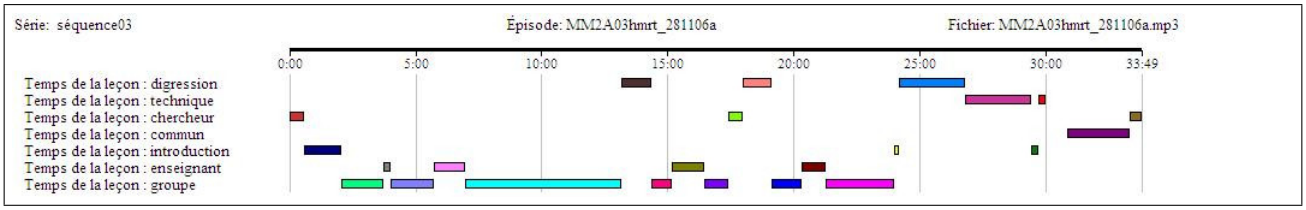


FIGURE D.19 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault.

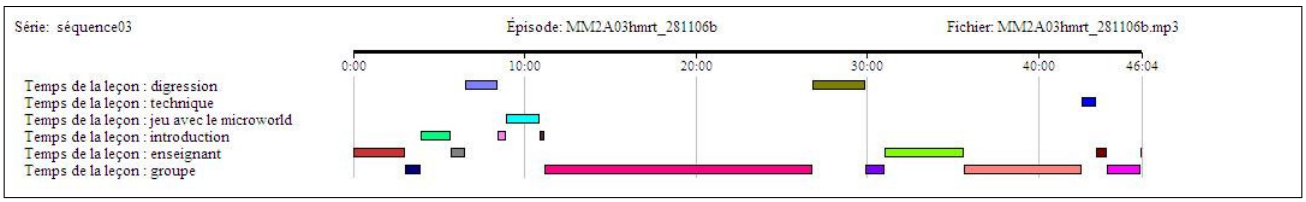


FIGURE D.20 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 28 novembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault.

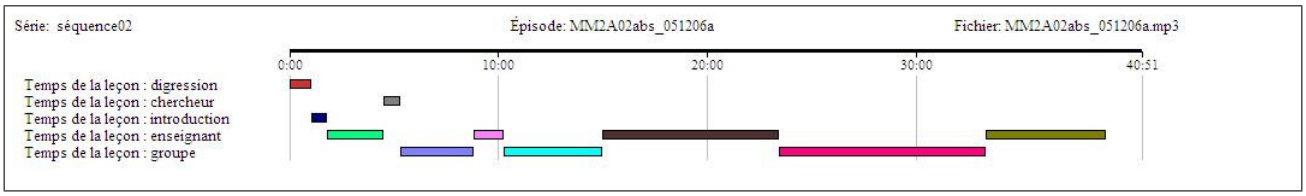


FIGURE D.21 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Aurélie, Barbara & Sylvie.

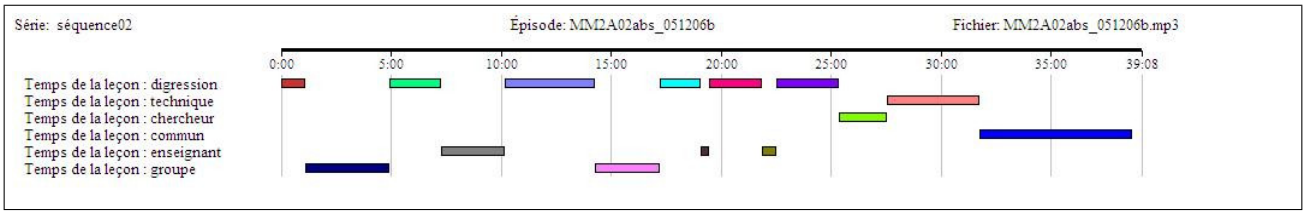


FIGURE D.22 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Aurélie, Barbara & Sylvie.

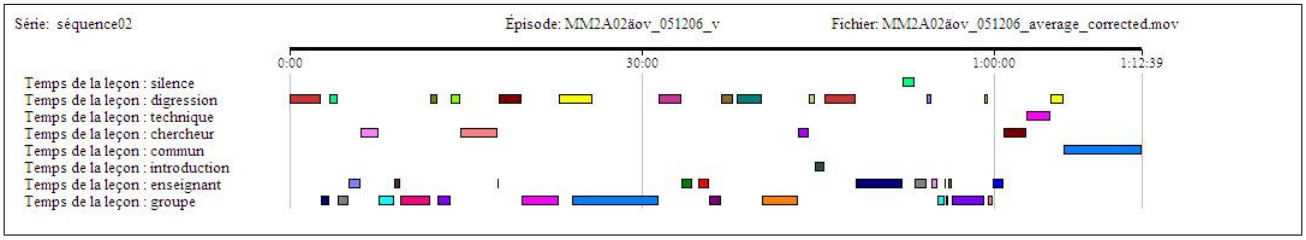


FIGURE D.23 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Annette, Ophélie & Victor.

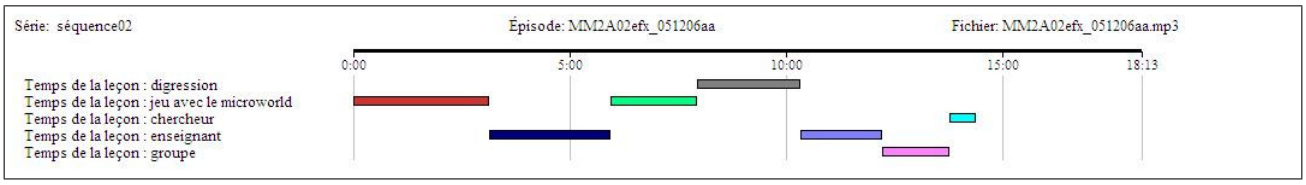


FIGURE D.24 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier.

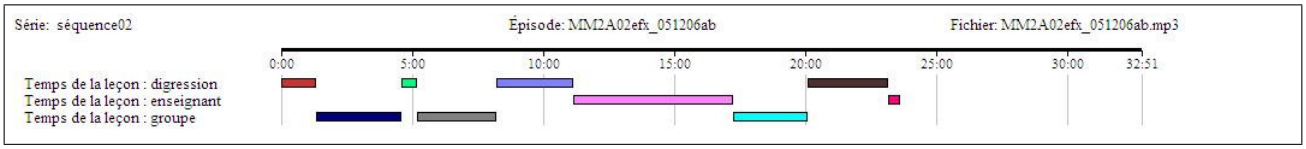


FIGURE D.25 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier.

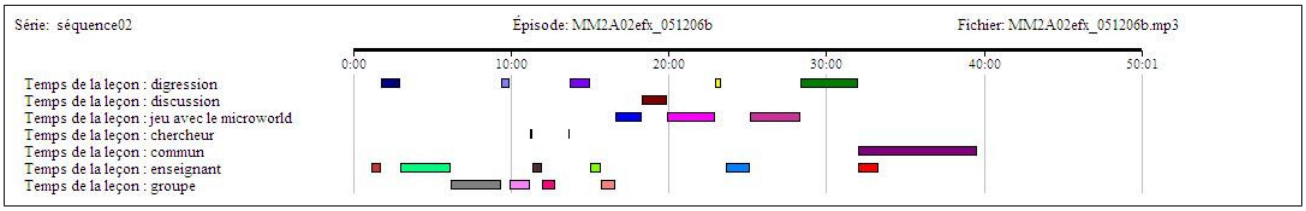


FIGURE D.26 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier.

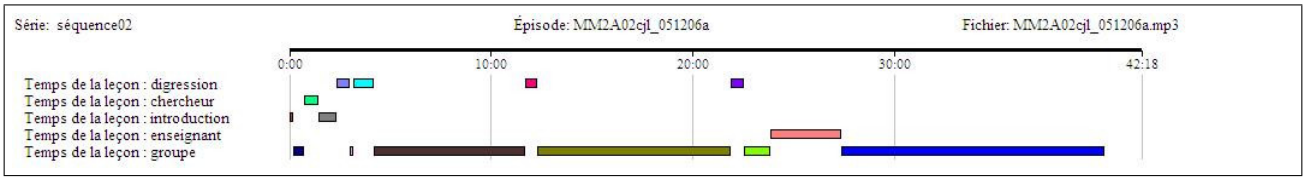


FIGURE D.27 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie.

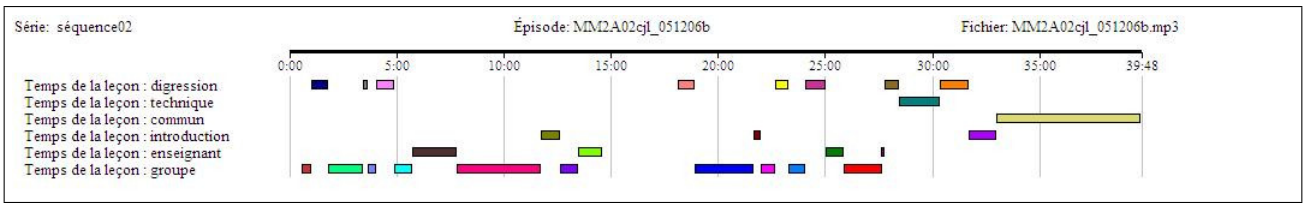


FIGURE D.28 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 5 décembre (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie.

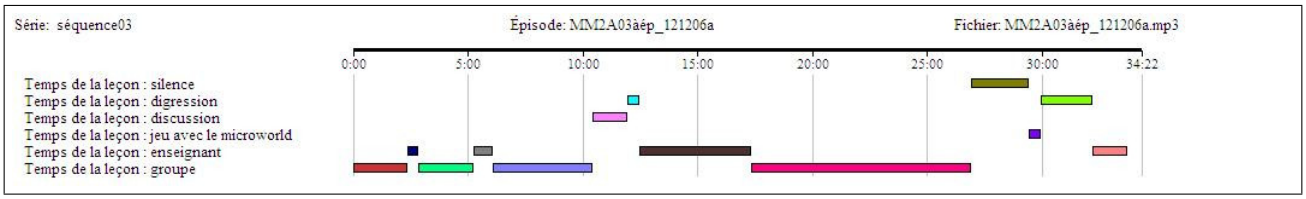


FIGURE D.29 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette.

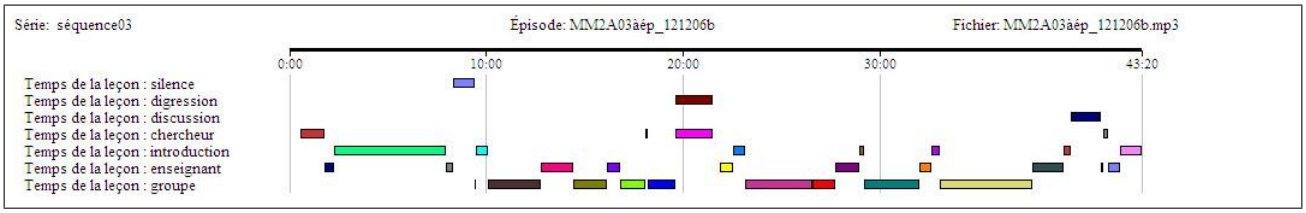


FIGURE D.30 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette.

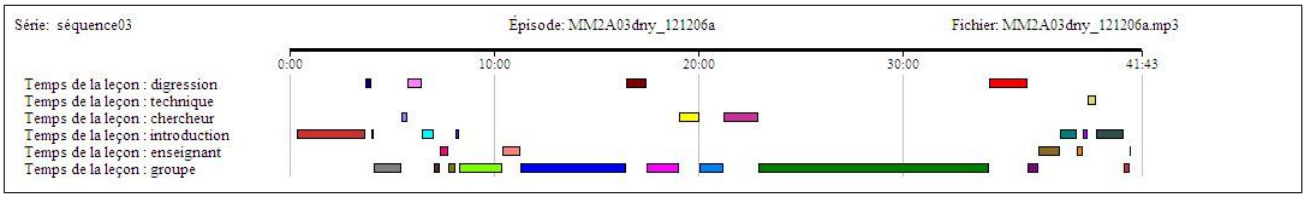


FIGURE D.31 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves.

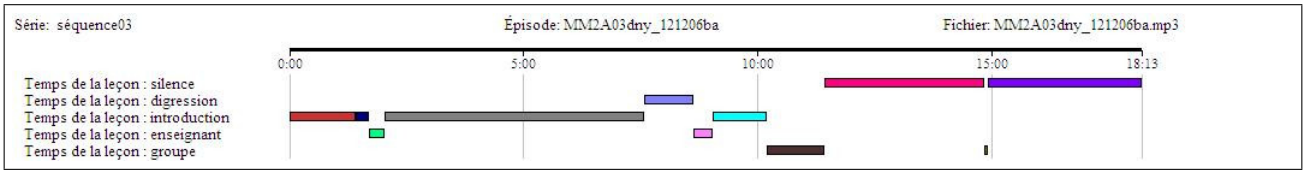


FIGURE D.32 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves.

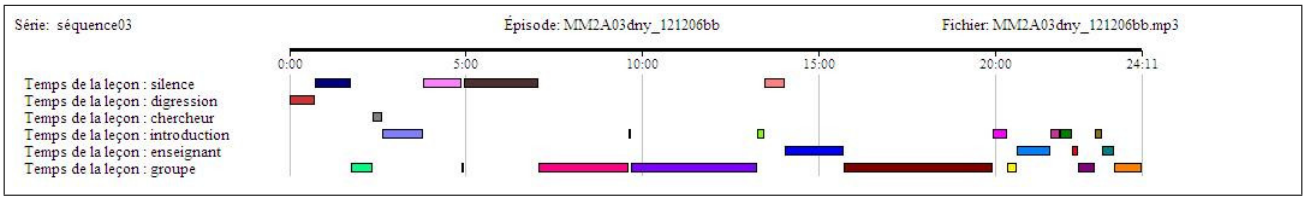


FIGURE D.33 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves.

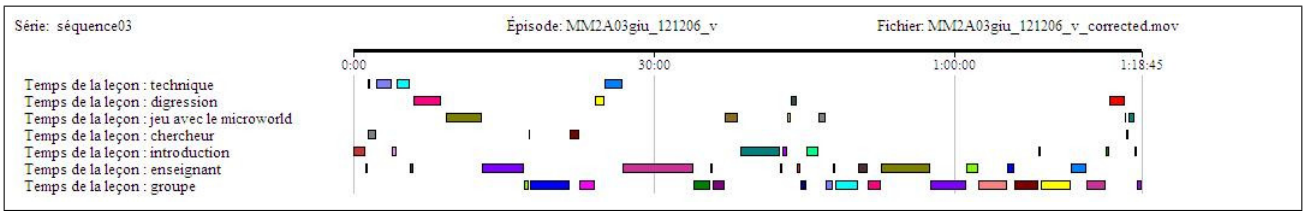


FIGURE D.34 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Germaine, Ilona & Urs.

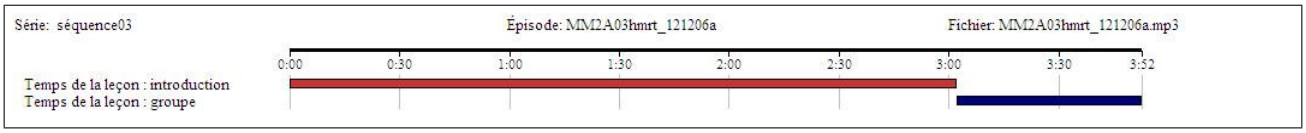


FIGURE D.35 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault.

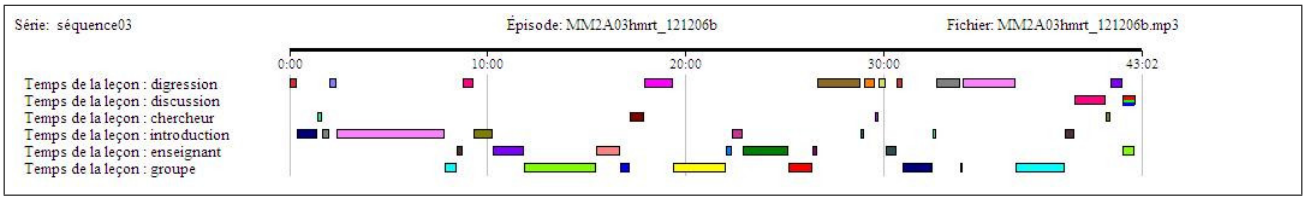


FIGURE D.36 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 12 décembre (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault.

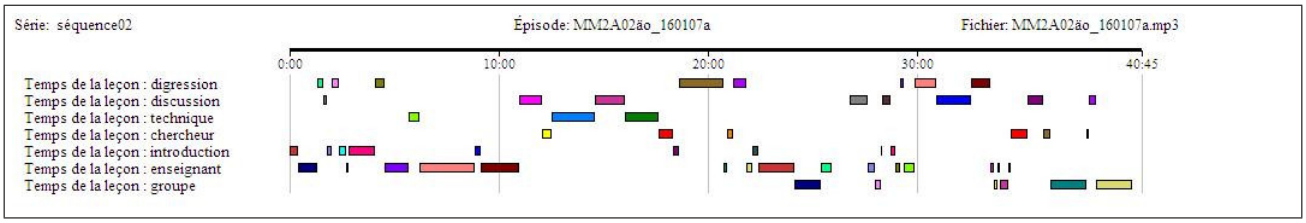


FIGURE D.37 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Annette & Ophélie.

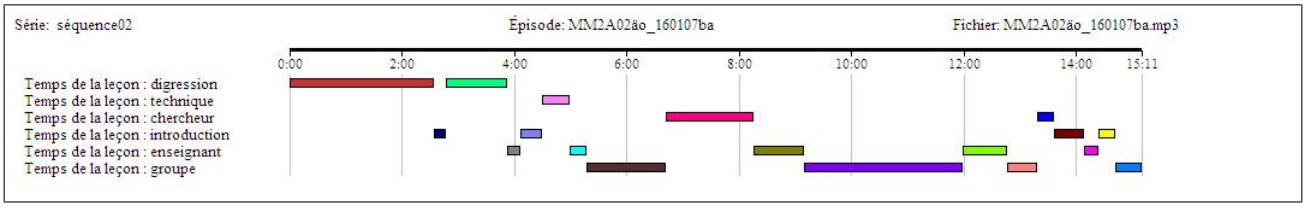


FIGURE D.38 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Annette & Ophélie.

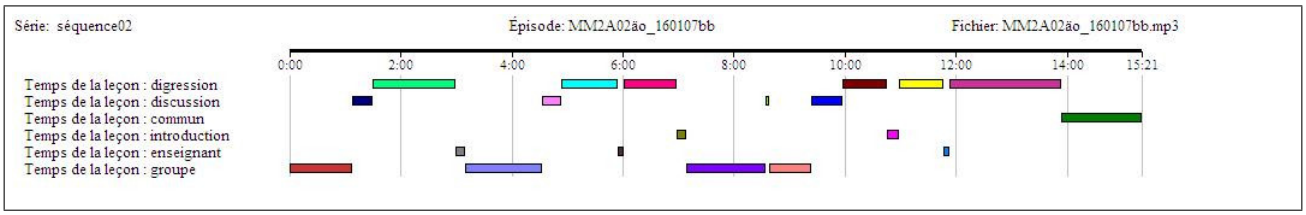


FIGURE D.39 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Annette & Ophélie.

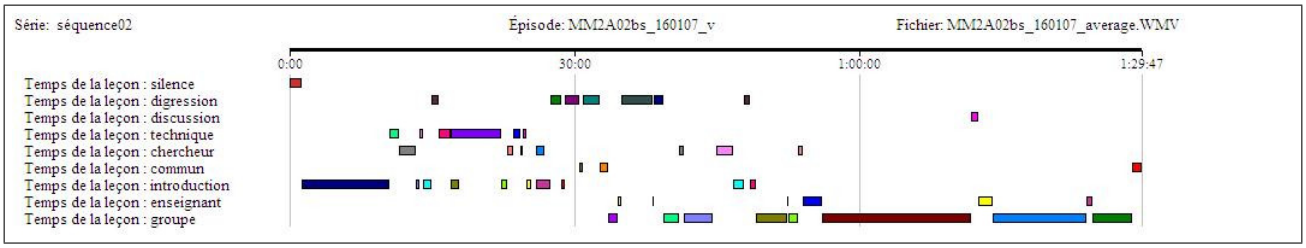


FIGURE D.40 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Barbara & Sylvie.

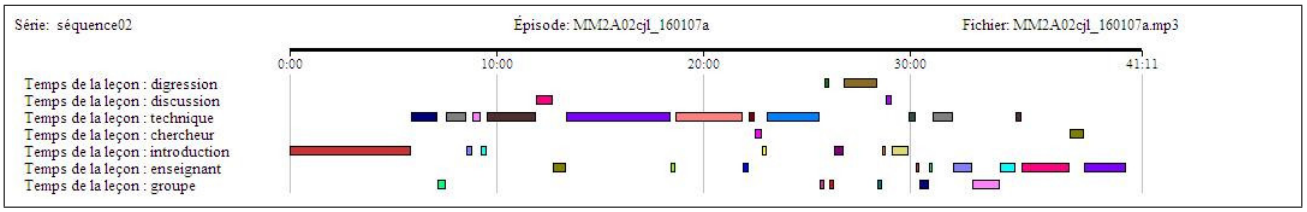


FIGURE D.41 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie.

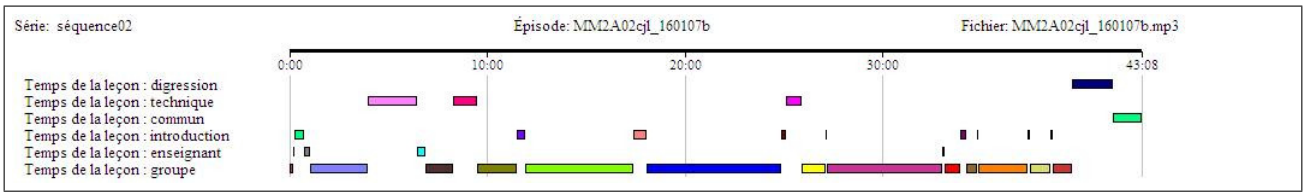


FIGURE D.42 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Cassandra, Julianne & Laurie.

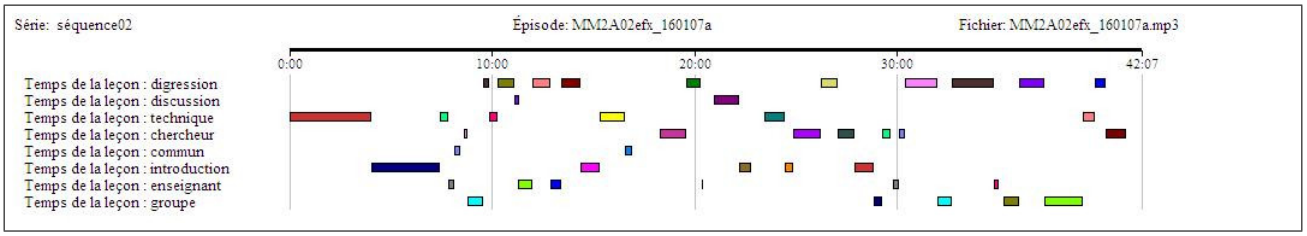


FIGURE D.43 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier.

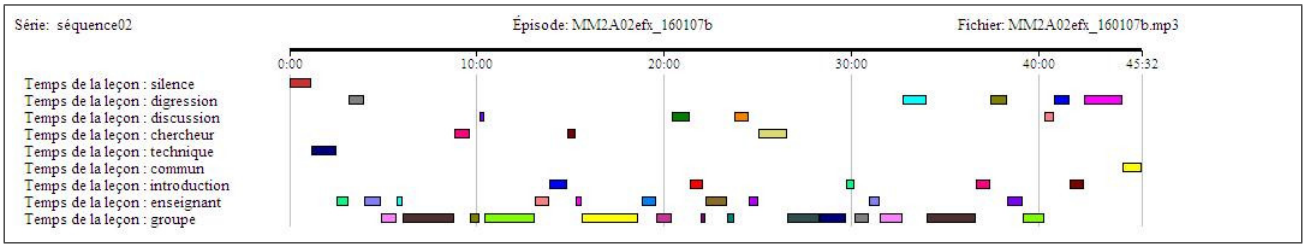


FIGURE D.44 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 16 janvier (séquence A) pour le groupe Ernest, Ferdinand & Xavier.

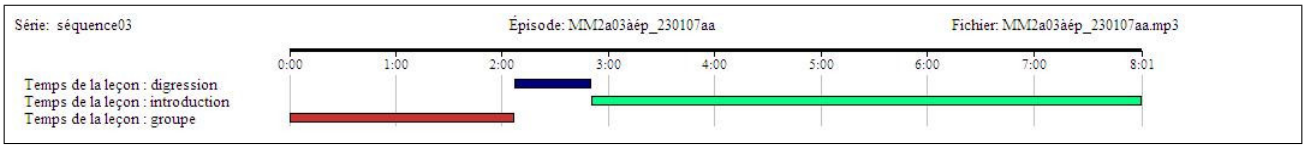


FIGURE D.45 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette.

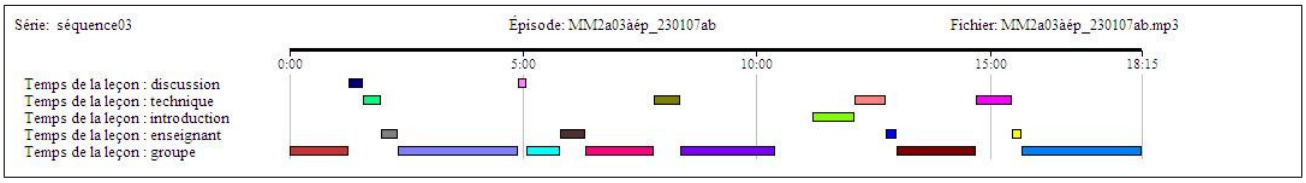


FIGURE D.46 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette.

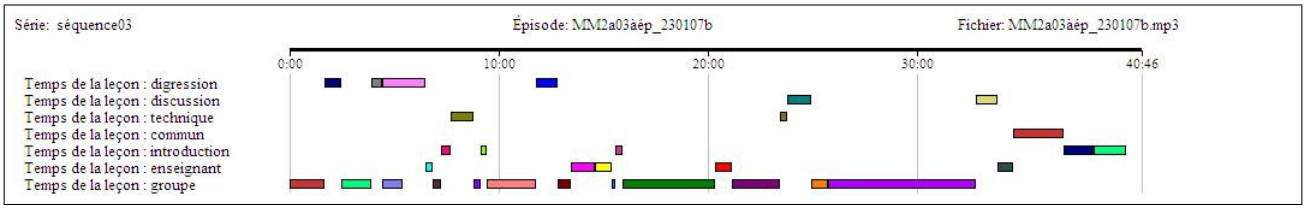


FIGURE D.47 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une troisième partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Alain, Etienne & Pierrette.

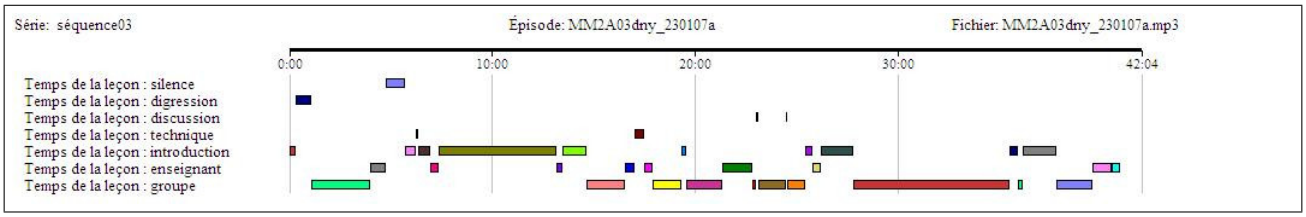


FIGURE D.48 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves.

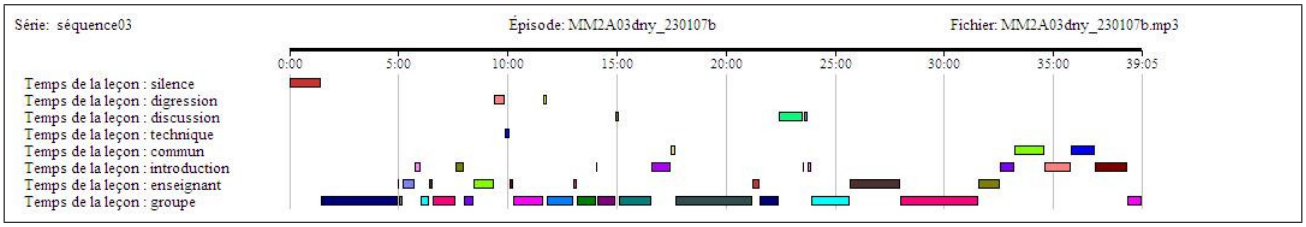


FIGURE D.49 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une deuxième partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Daniel, Nina & Yves.

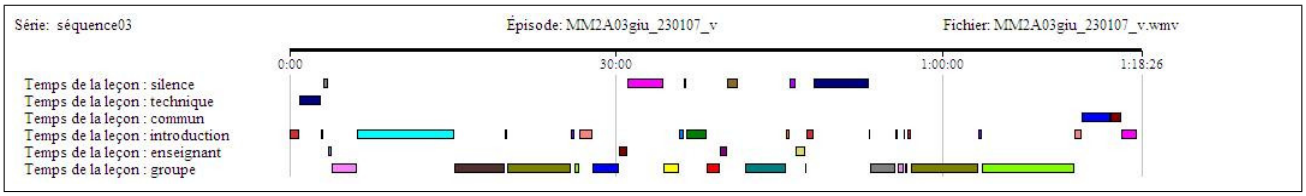


FIGURE D.50 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Germaine, Ilona & Urs.

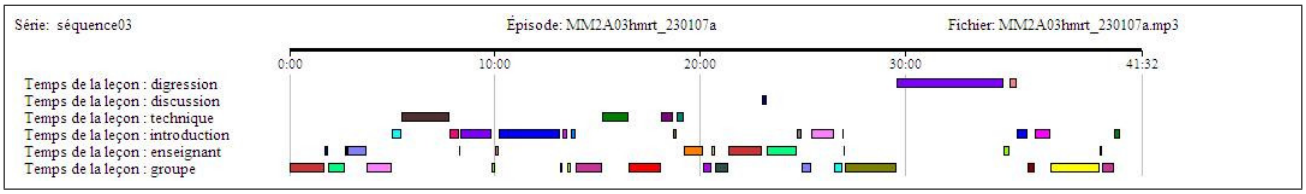


FIGURE D.51 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une première partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault.

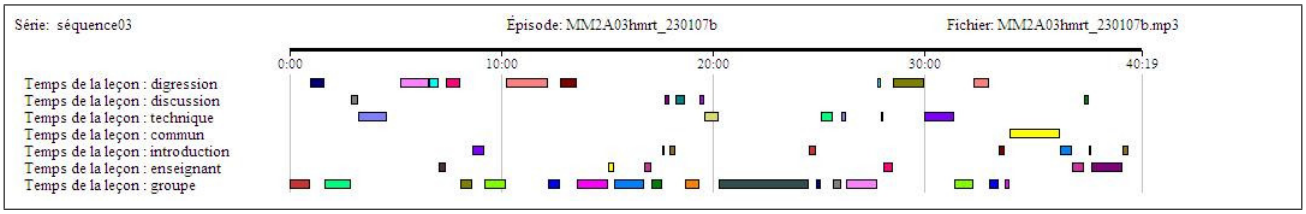


FIGURE D.52 – Séquence des intervalles temporels par type d'activité : analyse d'une seconde partie de la leçon du 23 janvier (séquence B) pour le groupe Henriette, Marie, Rose & Thibault.

D.3.2 Compléments aux analyses de logique naturelle

Cette section comprend des compléments aux analyses présentées au chapitre 6, avec des notations techniques qui n'étaient pas indispensables à la présentation des résultats, mais permettent aux lecteurs intéressés de retrouver les analyses de logique naturelle qui sous-tendent ces résultats.

D.3.2.1 Énonciation de la divergence de la situation de malentendu #1

L'énonciation en logique naturelle de la divergence entre l'enseignant et les élèves participant à la situation de malentendu #1 a été simplifiée, lors de la présentation de l'analyse. Les opérations logico-discursives des interlocuteurs sont présentées de manière plus complète ci-dessous.

Du point de vue de l'enseignant

Le discours de la consigne écrite sur la feuille d'exercice (reproduit ci-dessous) contient trois déterminations (δ) et une organisation raisonnée (τ).

Extrait de la consigne des exercices 1 et 2 - cours théorique MCU - Figure B.32 (p. 838)

```
1 1. Calculer la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre.
2 2. Extraire l'expression de g et calculer sa valeur.
```

Les opérations logico-discursives sont reproduites ci-dessous avec les expressions indicées des produits des opérations, à savoir les déterminés (d_1 à d_3) et la configuration (t_1) pour pouvoir y faire référence par la suite :

δ_1 : $\pm$calculer, {force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre} $\Rightarrow$ ($-$, que la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre calculer)

d_1 : ($-$, que la force d'attraction exercée par la Lune sur la Terre calculer)

δ_2 : $\pm$extraire, {expression de g} $\Rightarrow$ ($-$, que l'expression de g extraire)

d_2 : ($-$, que l'expression de g extraire)

δ_3 : $\pm$calculer, {valeur [de g]} $\Rightarrow$ ($-$, que la valeur [de g] calculer)

d_3 : ($-$, que la valeur [de g] calculer)

τ_1 : $(d_1, d_2) \Rightarrow d_2 \xrightarrow{et} d_3$

t_1 : $d_2 \xrightarrow{et} d_3$

Pour pouvoir énoncer le lien avec la partie théorique, partie A de la mise en page de la feuille, j'ai également besoin du déterminé de la loi de la force de gravitation, exprimée en langage mathématique [672] :

δ_0 : $\pm=$, $\pm x^2$, {F}, {G},{m},{M},{r} $\Rightarrow$ ($-$, que $F = G\frac{mM}{r^2}$)

d_0 : ($-$, que $F = G\frac{mM}{r^2}$)

A partir de ces références, je pose l'hypothèse de deux opérations d'organisation raisonnée par l'enseignant :

τ_2 : $(d_0, d_1) \Rightarrow d_0 \xrightarrow{application} d_1$

t_2 : $d_0 \xrightarrow{application} d_1$

τ_3 : $(d_0, d_2, d_3) \Rightarrow d_0 \xrightarrow{application} (d_2 \xrightarrow{et} d_3)$

t_3 : $d_0 \xrightarrow{application} (d_2 \xrightarrow{et} d_3)$

Ces deux formulations en logique naturelle permettent de spécifier le *lien logique* entre l'exercice 1 et 2 dans la schématisation de l'enseignant : il s'agit d'une *analogie*, et non d'une *séquence* entre les exercices. Autrement dit, le titre "application" se distribue sur les deux exercices de manière analogue, mais l'exercice 1 n'est pas la première partie de l'exercice 2.

672. Je n'ai pas trouvé d'expression en logique naturelle de discours mathématique, mais la théorie se définissant explicitement comme indépendante du langage utilisé (Grize, 1996), cela ne pose pas de problème de fond. Sur la forme, il convient de garder, comme toujours, le langage utilisé par le discours analysés, ce qui m'a conduit ici à utiliser le langage mathématique et à considérer "$=$" et "x^2" comme des prédicats, mais cela soulève une discussion complexe qui déborde largement le modeste usage qui en est fait ici.

Plusieurs arguments peuvent être donnés en faveur de cette hypothèse : la proximité des exercices 1 et 2 du fait qu'ils sont donnés sur la même feuille, à la suite, et qu'ils nécessitent tout deux l'usage de la loi de gravitation universelle et d'au moins une partie des "données astronomiques", d'une part, et leur indépendance, d'autre part, qui tient notamment au fait qu'on peut réussir l'exercice 2 sans avoir réussi l'exercice 1. Le rapport qu'entretiennent deux configurations analogues (ici t_2 et t_3) permet justement cette proximité tout en maintenant une indépendance dans le détail. En langage courant, on peut dire que les exercices 1 et 2 entretiennent des relations analogues à la loi de gravitation (une relation d'usage qui est, dans le détail, différente pour les deux exercices), mais pas une relation directe l'un avec l'autre. Par ailleurs, la nature de l'opération logico-discursive d'organisation raisonnée "$\xrightarrow{application}$" est suffisamment vague pour se référer à des usages divers de la loi de la force de gravitation.

Du point de vue de Pauline

Aucune trace discursive ne permet de spécifier la qualité d'une ou plusieurs opération(s) d'organisation raisonnée comme je l'ai fait pour l'enseignant à partir du titre "applications". Cependant, avant de concerner la qualité de cette relation, la divergence concerne les éléments mis en relation. Par hypothèse, je propose de poser les opérations d'organisation raisonnée suivantes pour représenter l'activité logico-discursive de Pauline :

τ_2 : $(d_0, d_1) \Rightarrow d_0 \xrightarrow{application} d_1$

$t_2 : d_0 \xrightarrow{application} d_1$

τ_4 : $(d_1, d_2, d_3) \Rightarrow d_1 \xrightarrow{?} (d_2 \xrightarrow{et} d_3)$

$t_4 : d_1 \xrightarrow{?} (d_2 \xrightarrow{et} d_3)$

Cette hypothèse permet de préciser la divergence entre les points de vue de l'enseignant et de Pauline : l'opération τ_2 serait identique pour l'enseignant et pour Pauline, ce que corrobore le résultat réussi de Pauline à l'exercice 1. Par contre, l'opération d'organisation raisonnée au sujet de l'exercice 2 n'est pas la même pour les deux points de vue : il s'agit de τ_4 pour Pauline, et de τ_3 pour l'enseignant, ce que corrobore le résultat partiellement erroné de Pauline. Ne disposant d'aucune trace discursive de l'activité de Pauline quant à la qualité de la configuration t_4, j'ai placé un point d'interrogation et écrit "$t_4 : d_1 \xrightarrow{?} (d_2 \xrightarrow{et} d_3)$". En partant de l'usage de Pauline, j'aurais pu considérer une relation implicite comme :

$t_4 : d_1 \xrightarrow{[contribue\ à]} (d_2 \xrightarrow{et} d_3)$".

Voici les arguments en faveur de cette hypothèse.

Premièrement, une organisation raisonnée comme τ_4 établit la continuité entre l'exercice 1 et 2 qui permet de reconstituer la cohérence du raisonnement de Pauline lorsqu'elle fait tomber la Lune sur la Terre pour extraire "g".

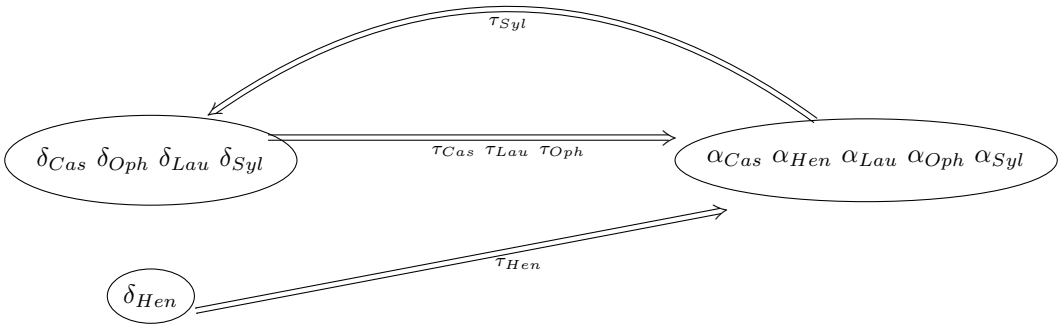
Deuxièmement, la mise en page qui présente les exercices 1 et 2 à la suite, les données en-dessous et un espace commun aux deux exercices pour écrire peut également aller dans le sens d'une configuration reliant d_1 d'une part, d_2 et d_3 d'autre part. Troisièmement, l'opération τ_4 est plus économique sur le plan cognitif que l'opération τ_3 de l'enseignant. C'est une préoccupation importante de toute activité scolaire que de fournir le moindre effort pour effectuer la tâche demandée, en raison des contraintes qui pèsent sur l'activité cognitive dans le milieu (temps limité à disposition, évaluation, etc.). L'opération τ_4 permet à Pauline de ne pas modéliser une deuxième fois, comme elle l'a fait pour l'exercice 1, en prenant un objet quelconque qui tombe à la surface de la Terre : elle réutilise la modélisation de l'exercice 1 pour passer directement aux équations et à la transposition des valeurs dans l'expression mathématique.

Je propose ci-dessous une reconstruction *en langage mathématique* de l'opération logico-discursive (représentée par la double flèche) effectuée par Pauline lorsqu'elle écrit cette deuxième égalité dans sa réponse manuscrite, en explicitant les implicites à l'aide du langage mathématique :

$$\overrightarrow{F}_{nette} = m\overrightarrow{a} \Rightarrow_G \cdot \frac{M_T \cdot M_L}{r^2} = M_L \cdot g \tag{D.4}$$

D.3.2.2 Énonciation du cheminement #1 de la situation de malentendu #2

Le cheminement #1 de la situation de malentendu #2 est représenté avec les opérations logico-discursives sur le graphe de la figure D.53, ci-dessous.



Légende :
de gauche à droite : ordre de construction de la schématisation
$\Rightarrow$: relation par opération logico-discursive
$\alpha_{Henriette}$, $\alpha_{Ophélie}$: |...| $\Rightarrow$ {même force}
$\alpha_{Cassandra}$, α_{Laurie} : |...| $\Rightarrow$ {même force de gravité}
α_{Sylvie} : |...| $\Rightarrow$ {même force d'apesanteur}
$\delta_{Cassandra}$, δ_{Laurie}, $\delta_{Ophélie}$: (...) $\Rightarrow$ (−, que les deux balles toucher le sol en même temps)
$\delta_{Henriette}$: (...) $\Rightarrow$ (−, que la boule de pétanque [toucher le sol en premier])
δ_{Sylvie} : (...) $\Rightarrow$ (−, que les deux balles tomber en même temps par terre)
$\tau_{Cassandra}$, $\tau_{Henriette}$, τ_{Laurie}, $\tau_{Ophélie}$: (...) $\xrightarrow{car}$ (...)
τ_{Sylvie} : (...) $\xrightarrow{donc}$ (...)

FIGURE D.53 – Graphe du cheminement #1, situation de malentendu #2.

Dans ce graphe, les opérations semblables effectuées par des élèves différents sont regroupées de manière à représenter le croisement entre opérations logico-discursives (représentées par les lettres grecques), et leur contenu : ce graphe regroupe dans une même zone les opérations produisant des objets de discours semblables. La référence aux individus qui opèrent par leur discours est fournie en indice des opérations avec les trois premières lettres du prénom de l'élève, et l'ordre de construction de la schématisation est déterminant pour la direction des flèches représentant les opérations τ.

Il est intéressant de remarquer que l'ordre reconstruit par la logique naturelle est inverse à celui du cheminement de pensée partant de concept de physique et aboutissant à la réponse au problème, sauf pour Sylvie, qui schématise une opération $\tau \xrightarrow{donc}$, dans un cheminement déductif partant de la théorie en physique pour répondre à la question posée. Sylvie est aussi l'élève la plus performante de la classe, parmi ceux concernés par la situation de malentendu. Enfin, c'est également l'élève qui interprète son travail d'élève comme une tâche de physicienne, dans un sens que j'oppose ici à une interprétation en tant que *métier d'élève*, comme le met en évidence le débat qu'elle entretient avec Barbara (voir section 6.6.4.5, p. 592).

Cette analyse m'invite à poser l'hypothèse suivante : comme les (autres) élèves procèdent dans l'ordre inverse à celui escompté par l'enseignant - et utilisé par un expert - il n'est pas exclu qu'ils construisent leurs connaissances, notamment les concepts, *à partir des réponses* aux questions des exercices effectués plutôt que *pour* répondre à ces exercices, c'est-à-dire à partir des *questions*.

Dans l'exemple ci-dessus, Cassandra, Henriette, Laurie et Ophélie répondent à la question et vont ensuite chercher une raison à leur réponse. Dans d'autres exemples, cela pourrait paraître un artifice du langage, subséquent à l'organisation syntaxique de la phrase utilisant le connecteur "car".

Dans les traces analysées pour cette situation de malentendu, le contenu vient soutenir l'hypothèse d'une pensée dans le sens indiqué par la figure D.53 (p. 974), pour au moins trois raisons :

— en partant de réponses différentes, celle de Henriette ou celle des autres élèves, ces cinq élèves reconstruisent une explication identique ;

— l'explication fournie est basée sur une classe-objet {même force} qui n'existe pas telle quelle dans la schématisation de l'enseignant, et apparaît fabriquée pour l'occasion ;

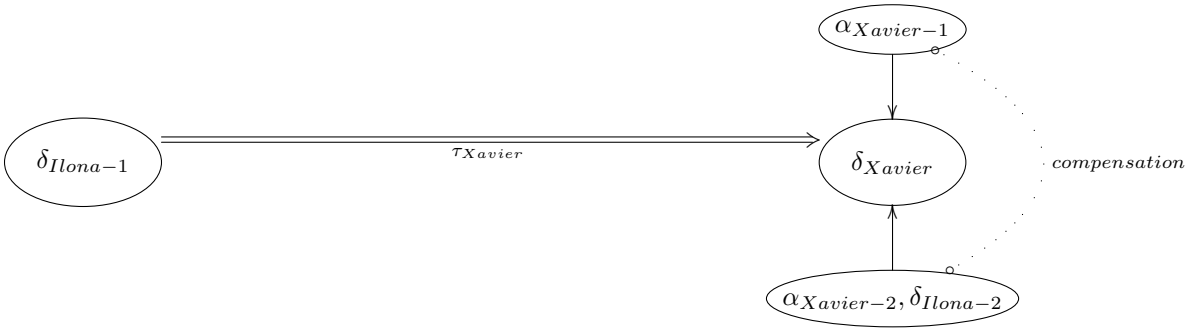
— la réponse conforme au modèle enseigné est probablement connue des élèves - il suffit de l'entendre dire une fois - *avant* qu'ils ne parviennent à comprendre sa justification, son explication.

Cette observation vient remettre en cause un point précis de la théorie des situations didactiques : l'assomption de Brousseau qu'il est nécessaire de ne pas communiquer la réponse pour permettre aux élèves de la retrouver par eux-mêmes. En effet, si cette idée est largement répandue parmi les enseignants et paraît, de leur point de vue, de l'ordre du bon sens - en particulier dans le jeu qui consiste à évaluer les performances des élèves - elle se heurte au fonctionnement cognitif réel des élèves qui sont tributaire

d'un langage pour acquérir des connaissances[673]. En effet, l'apprenant est bien obliger de procéder dans l'ordre inverse du raisonnement expert, et de partir des savoirs établis pour en reconstruire les origines, la filiation historique et intellectuelle. Compte tenu de cette asymétrie entre expert et novice, enseignant et apprenant, cacher l'enjeu de l'intrigue comme le propose Brousseau et comme cela se pratique si souvent en milieu scolaire, revient à faire partir les élèves d'un point d'origine confus pour en reconstruire la filiation à partir des implicites d'une situation dans laquelle, de plus, ces élèves ne sont pas garantis de réussir... On comprend que cela devienne difficile.

D.3.2.3 Énonciation du cheminement #2 de la situation de malentendu #2

Le cheminement #1 de la situation de malentendu #2 est représenté avec les opérations logico-discursives sur le graphe de la figure D.54 (voir ci-dessous).



Légende :
de gauche à droite : ordre de construction de la schématisation
$\Rightarrow$: relation par opération logico-discursive
$\rightarrow$: relation par prédication (classe-objet utilisé dans une détermination)
$\cdots$: relation implicite formulée en fonction de la situation d'énonciation
$\alpha_{Xavier-1}$: $|...| \Rightarrow$ {g}
$\alpha_{Xavier-2}$: $|...| \Rightarrow$ {frottement de l'air}
$\delta_{Ilona-1}$: $(...) \Rightarrow$ (−, que [les deux balles] arriver en même temps)
$\delta_{Ilona-2}$: $(...) \Rightarrow$ (−, que la force qui freine se faire en fonction de la masse)
δ_{Xavier} : $(...) \Rightarrow$ (−, que g et le frottement de l'air être égalés)
τ_{Xavier} : $(...) \xrightarrow{car} (...)$

FIGURE D.54 – Représentation schématique complète du cheminement #1, situation de malentendu #2.

Ce graphe met bien en évidence le raisonnement compensatoire, mis en évidence par Piaget et son équipe dans les raisonnements des enfants à un stade intermédiaire de la *conservation*. Les adolescents ou jeunes adultes de cette recherche y recourent également, à l'occasion, face à une question dont la complexité nécessiterait une modélisation mathématique qu'ils ne font pas, soit que les ressources mises à disposition en classe de physique à ce moment-là ne suffisent pas, soit qu'ils ne savent pas comment s'y prendre. En particulier, le fait de devoir s'intéresser à deux variables semblent stimuler, chez certains élèves, ce raisonnement compensatoire plutôt que la recherche d'un modèle permettant d'évaluer l'intensité : ici,

673. Mon commentaire ici concerne tous les apprentissages qui se font par l'intermédiaire d'un langage, et qui place l'apprenant face à une double tâche : s'approprier à la fois le langage, et son usage instrumental pour en faire autre chose. Lorsqu'il est possible d'acquérir les connaissances par son action propre, dans des boucles rétro-actives avec la matière, comme c'est le cas si j'apprends à planter un clou avec un marteau, la situation est sensiblement différente.

c'est l'intérêt de ces élèves la fois à l'effet de la force de gravitation et des forces de frottement qui conduit à une compensation des effets, dans leur cheminement, alors que le calcul des intensités des forces, nécessaire à établir une telle compensation, n'a pas été fait. Dans d'autres situations de malentendu, par exemple au sujet de l'item #4, c'est le fait de s'intéresser à deux moments (l'impulsion donnée au chariot, puis sa trajectoire jusqu'à la ligne d'arrivée) qui suscite des raisonnements compensatoires chez certains élèves, comme s'il y avait une sorte de convention sociale ou facilité de pensée qui consiste à considérer, face à *deux* éléments fonctionnant de manière antagoniste, qu'ils se *compensent* forcément.

D.3.2.4 Énonciation du cheminement du groupe à la situation de malentendu #6

Le cheminement d'Aurélie, Barbara et Sylvie lors de la conversation du groupe sur l'exercice 5D, à la situation de malentendu #6, est représenté avec les opérations logico-discursives d'organisation raisonnée (τ) sur le graphe de la figure D.55 (voir ci-dessous).

Ce graphe permet de rendre compte de la construction, au cours de la schématisation, d'une structure conversationnel relativement complexe et hiérarchisée, avec les termes utilisés par les élèves : on observe par exemple qu'un terme comme "et" peut prendre au fil d'une conversation particulière, selon la situation et le contexte, une valeur logique complètement différente de celle définie abstraite en logique formelle (la *conjonction*). Dans cet exemple, ce petit mot "et" introduit rien de moins qu'une nouvelle conversation subordonnée, notamment.

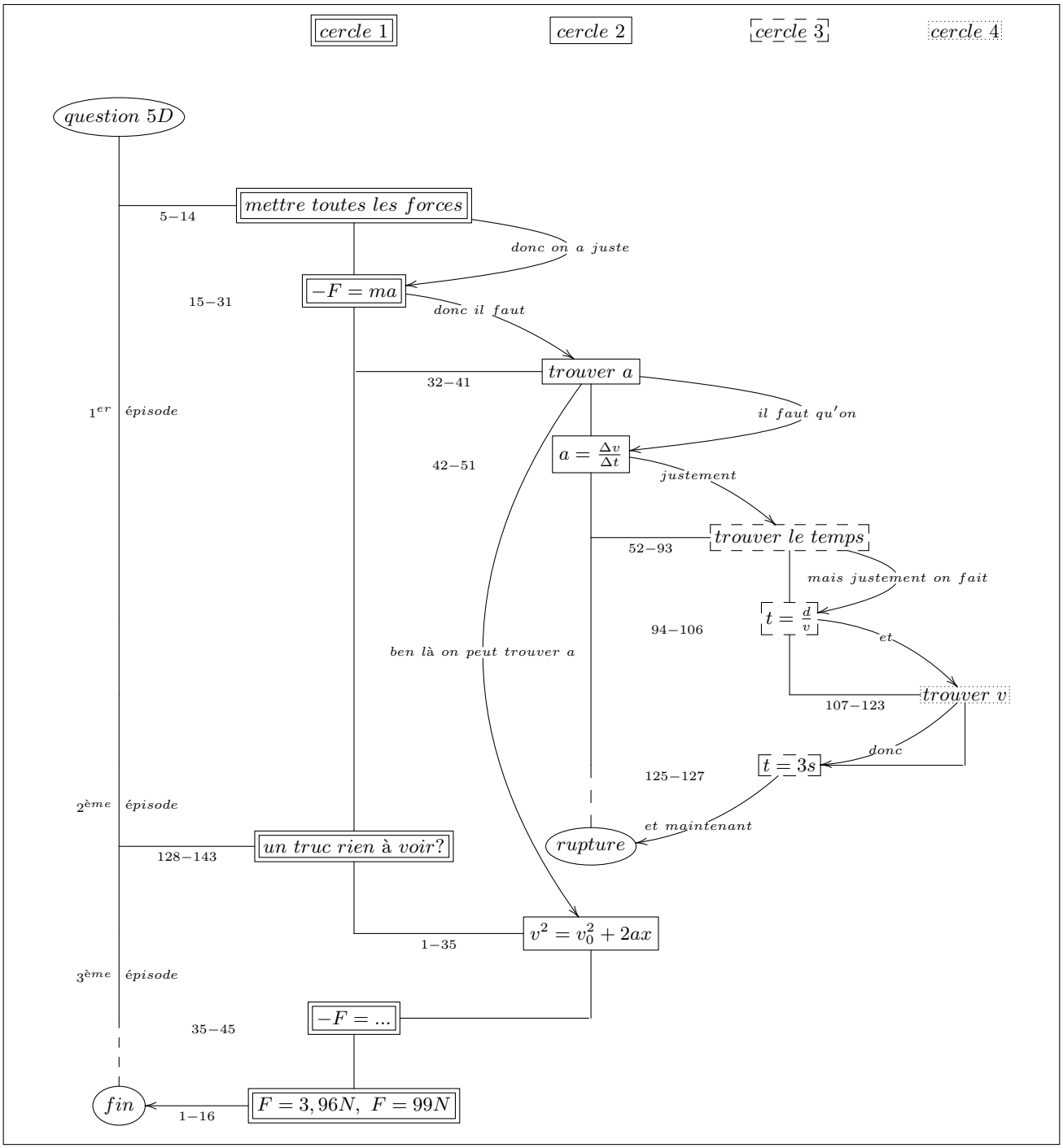


FIGURE D.55 – Graphe de la structure conversationnelle des trois épisodes, avec les opérations d'organisation raisonnée (τ) du groupe.