

MODÉLISATION D'UN AGENT AUTONOME :

APPROCHE CONSTRUCTIVISTE DE

L'ARCHITECTURE DE CONTRÔLE

ET DE

LA REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES

THÈSE

présentée à la Faculté des sciences, pour obtenir

le grade de Docteur ès sciences, par

Miguel RODRIGUEZ

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL  
Institut d'Informatique et d'Intelligence Artificielle  
rue Émile-Argand 11  
2007 Neuchâtel, Suisse

# IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Modélisation d'un agent autonome: approche  
constructiviste de l'architecture de contrôle  
et de la représentation des connaissances  
.....  
.....  
de Monsieur Miguel Rodriguez.....

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

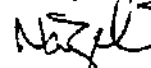
La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel  
sur le rapport des membres du jury,

Messieurs J.-P. Müller, P.-J. Erard, H.-H. Nägeli,  
P. Bourguine (Antony/Paris) et Y. Demazeau  
(Grenoble)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 29 septembre 1994

Le doyen,



H.-H. Nägeli

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, par leur participation et leurs encouragements, m'ont permis de mener à bonne fin ce travail de thèse.

En premier lieu, le Professeur Jean-Pierre MÜLLER, mon directeur de thèse, qui m'a offert un cadre de travail des plus favorables et m'a fait bénéficier de la qualité de son encadrement et de la pertinence de ses conseils tout au long de ces quatre années de recherche.

Monsieur Paul BOURGINE, responsable du Laboratoire de Vie et d'Intelligence Artificielle du CEMAGREF (Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts - Paris), pour toutes les conversations enrichissantes que nous avons eues et pour l'intérêt qu'il démontre envers mon travail en acceptant de l'étudier et d'en être rapporteur.

Monsieur Yves DEMAZEAU, chargé de recherches au Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle du CNRS (LIFIA, Grenoble), pour avoir également accepté d'être rapporteur et pour la sympathie qu'il m'a toujours témoignée lors de nos rencontres.

Le Professeur Pierre-Jean ERARD, de l'Institut d'Informatique et Intelligence Artificielle (IIIA) de l'Université de Neuchâtel, pour avoir accepté d'être membre du jury et pour les occasions qu'il m'a données d'élargir ma réflexion dans des domaines contigus à mon sujet de thèse.

Le Professeur Hans-Heinrich NÄGELI, de l'IIIA, pour avoir également accepté d'être membre du jury et dont la critique constructive a toujours été bénéfique.

D'autre part, j'associe à la réussite de ce travail mon compagnon de recherche Yoel GAT qui, par les longues discussions que nous avons eues, a partagé une grande partie de mes soucis et de mes joies. Merci à toute l'équipe de l'Institut de Microtechnique de l'Université de Neuchâtel ayant collaboré dans le cadre du projet MARS, à savoir: François TIÈCHE, Claudio FACCHINETTI, Gilbert MAÎTRE, Fabrice CHANTEMARGUE, Heinz HÜGLI et Jean-Pierre AMMAN.

De même, je ne saurais apprécier à sa juste valeur l'apport de Miriam SCAGLIONE de par ses compétences en sciences cognitives et ses qualités humaines.

Merci également à tous les assistants et chercheurs de l'IIIA pour leur support technique, scientifique et moral.

Mon amitié à Philippe et Malika pour leurs encouragements réguliers, alors même que tout restait encore à faire.

Ma plus profonde reconnaissance à mes parents qui m'ont donné la possibilité d'étudier et m'ont enseigné, de la façon la plus naturelle qui soit, à travers l'exemple, les bienfaits de la régularité et de la persévérance.

Enfin, Mary-Tere, mon épouse, qui par son optimisme et sa patience a su me donner quotidiennement la sérénité et la force nécessaires à l'aboutissement de cette thèse. Ce travail est en grande partie le sien. Je le dédie à elle et à l'enfant qui va naître.

Marin, le 4 mai 1994.

## *Modélisation d'un agent autonome*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1	Préambule	1
1.2	Contexte	1
1.3	Motivations et démarche	2
1.4	Problématique abordée	2
1.4.1	Architectures de systèmes autonomes	3
1.4.2	Représentation des connaissances	3
1.4.3	Remarque	4
1.5	L'autonomie et ses multiples facettes	4
1.5.1	Un point de vue externe à l'agent	4
1.5.2	Un point de vue interne à l'agent	6
1.5.3	Discussion	10
1.6	Cadre conceptuel	11
1.6.1	Architecture: holisme et synthèse	12
1.6.2	Représentation: constructivisme et non-objectivisme	12
1.7	Contributions	13
1.8	Plan de thèse	14
1.8.1	Partie I: L'autonomie en IA; un état de l'art	15
1.8.2	Partie II: Un modèle d'agent autonome	15
<b>I</b>	<b>L'autonomie en Intelligence Artificielle</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>L'autonomie par le raisonnement</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction	19
2.2	Les fondements du courant cognitiviste en IA	19
2.3	L'architecture fonctionnelle	20
2.4	La représentation du monde	21
2.5	Le raisonnement en IA	23
2.6	La génération de plans d'actions	23
2.7	Conclusion	31
<b>3</b>	<b>L'autonomie par l'action</b>	<b>33</b>
3.1	Introduction	33
3.2	Les fondements du comportementalisme	34
3.3	La problématique	35
3.4	Cinq architectures de contrôle	36
3.5	Le contrôle par priorités	39
3.5.1	La <i>subsumption architecture</i> de Brooks	39
3.5.2	Le système <i>Pengi</i> d'Agre et Chapman	44
3.5.3	Commentaires	46
3.6	Le contrôle par fusion	46
3.6.1	Fusion comportementale: Anderson et Donath	47
3.6.2	Fusion de buts: les plans internés de Payton	50
3.6.3	Commentaires	52
3.7	Le contrôle par compétition	53

3.7.1	Compétition d'opérateurs STRIPS: Pattie Maès . . . . .	54
3.7.2	Compétition de pseudo-neurones: l'Aplysia de Beer . . . . .	57
3.7.3	Commentaires . . . . .	62
3.8	Le contrôle connexionniste . . . . .	62
3.8.1	Généralités . . . . .	63
3.8.2	Les réseaux de neurones . . . . .	65
3.8.3	La morphodynamique . . . . .	68
3.8.4	Commentaires . . . . .	70
3.9	Conclusion . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Approches hybrides . . . . .</b>	<b>73</b>
4.1	Introduction . . . . .	73
4.2	Problématique . . . . .	74
4.3	Solutions proposées . . . . .	75
4.4	L'approche <i>top-down</i> de Ron Arkin . . . . .	76
4.5	L'approche <i>bottom-up</i> de Maja Mataric . . . . .	78
4.6	Les schèmes de Piaget repris par Drescher . . . . .	81
4.7	Conclusion . . . . .	82
<b>II</b>	<b>Un modèle d'agent autonome . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>ARCO: une architecture d'agent autonome . . . . .</b>	<b>91</b>
5.1	Les trois niveaux d'abstraction . . . . .	91
5.2	Des dynamiques emboîtées . . . . .	92
5.3	Propriétés de l'architecture . . . . .	93
5.4	Implantation distribuée . . . . .	94
5.5	Commentaires . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Le niveau physique . . . . .</b>	<b>97</b>
6.1	Introduction . . . . .	97
6.2	Les capteurs . . . . .	97
6.3	Capteurs et autonomie . . . . .	100
6.4	Les effecteurs . . . . .	100
6.5	Effecteurs et autonomie . . . . .	101
6.6	La communication . . . . .	101
6.7	Commentaires . . . . .	101
<b>7</b>	<b>Le niveau comportemental . . . . .</b>	<b>105</b>
7.1	Nature de l'activité . . . . .	105
7.1.1	Le comportement, le réflexe et l'instinct . . . . .	105
7.1.2	Une activité instinctive . . . . .	106
7.1.3	Capacités innées et capacités acquises . . . . .	106
7.2	Un langage de description . . . . .	107
7.2.1	Caractérisation des boucles sensori-motrices . . . . .	107
7.2.2	Une formalisation de l'activité . . . . .	108
7.3	Remarques . . . . .	108
7.3.1	Le choix des stimuli pertinents . . . . .	108
7.3.2	Intensité de stimulation: dichotomique ou multi-valuée . . . . .	109
7.4	Illustration . . . . .	109
7.4.1	Quatre instincts simples . . . . .	110
7.4.2	Formalisation de l'exemple . . . . .	111
7.4.3	Mesure combinatoire de l'espace sensori-moteur de l'agent . . . . .	111
7.4.4	L'environnement physique et environnement sensoriel . . . . .	111

## Table des matières

7.5	Discussion . . . . .	112
<b>8</b>	<b>Le niveau cognitif</b>	<b>113</b>
8.1	Introduction . . . . .	113
8.2	L'architecture cognitive . . . . .	113
8.2.1	Sa fonction . . . . .	113
8.2.2	Sa structure . . . . .	114
8.3	La connaissance: introduction . . . . .	115
8.4	Concepts et terminologie . . . . .	115
8.4.1	Cognition de bas niveau et cognition de haut niveau . . . . .	115
8.4.2	Représentations objectivistes et non-objectivistes . . . . .	116
8.5	Position adoptée . . . . .	116
8.5.1	Approche non-objectiviste et cognition de bas niveau . . . . .	116
8.5.2	Une approche synthétique de la connaissance . . . . .	117
8.6	La problématique abordée . . . . .	118
8.7	Solutions apportées . . . . .	119
8.7.1	Le vécu sensori-moteur comme unique réalité . . . . .	119
8.7.2	Représentation de la topologie de l'interaction . . . . .	121
8.7.3	Déterminisme et ambiguïté . . . . .	123
8.7.4	Optimisation . . . . .	125
8.8	Quelques propriétés . . . . .	125
8.8.1	Représentation de l'interaction et du monde . . . . .	126
8.8.2	Une nouvelle nature symbolique . . . . .	128
8.8.3	Perspectives . . . . .	128
8.9	Résumé . . . . .	129
<b>9</b>	<b>Les processus cognitifs</b>	<b>131</b>
9.1	Introduction . . . . .	131
9.2	L'interprétation . . . . .	133
9.2.1	Concepts et terminologie . . . . .	133
9.2.2	Une approche concrète . . . . .	134
9.2.3	Commentaires . . . . .	137
9.3	L'apprentissage . . . . .	138
9.3.1	Concepts et terminologie . . . . .	138
9.3.2	Une approche concrète . . . . .	140
9.3.3	Commentaires . . . . .	144
9.4	La motivation . . . . .	146
9.4.1	Concepts et terminologie . . . . .	146
9.4.2	Une approche concrète . . . . .	147
9.4.3	Commentaires . . . . .	152
9.5	La fonctionnalisation . . . . .	154
9.5.1	Fonctionnalisation générale . . . . .	154
9.5.2	Fonctionnalisations partielles . . . . .	154
9.5.3	Commentaires . . . . .	156
<b>10</b>	<b>Expérimentation</b>	<b>159</b>
10.1	Spécifications . . . . .	159
10.1.1	L'agent cognitif . . . . .	159
10.1.2	L'agent comportemental . . . . .	160
10.1.3	Le milieu . . . . .	160
10.1.4	Les besoins de l'agent . . . . .	161
10.1.5	Environnement d'expérimentation . . . . .	161
10.2	Phases d'expérimentation . . . . .	163
10.3	L'apprentissage . . . . .	163

## *Modélisation d'un agent autonome*

10.3.1 Observations . . . . .	164
10.4 La fonctionnalisation . . . . .	164
10.4.1 Observations . . . . .	165
10.5 Commentaires . . . . .	165
<b>11 Conclusion</b> . . . . .	<b>167</b>
11.1 Bilan . . . . .	167
11.2 Comparaisons avec l'état de l'art . . . . .	168
11.3 Perspectives . . . . .	169

# Introduction générale

## 1.1 Préambule

L'Homme s'est, de tous temps, penché sur les principes régissant la cognition. Il s'est aventuré dans l'énoncé de modèles spécifiques qui, de par leurs imperfections, ont stimulé la réflexion et ont fortement influencé toute la tradition intellectuelle occidentale.

D'où provient la connaissance? En quoi consiste-t-elle? Comment est-elle représentée dans la pensée humaine?

Depuis l'Antiquité, les civilisations ont successivement développé, affermi, régénéré ou bouleversé les disciplines liées à l'étude de l'Homme et de la Connaissance. Elles ont proposé des théories et des méthodologies que le temps a permis de juger.

De nos jours, une partie de la communauté scientifique, provenant de disciplines très diverses (la philosophie, la psychologie, la linguistique, l'anthropologie, les neurosciences et l'intelligence artificielle) remonte à ces mêmes préoccupations et se reconnaît dans l'esprit de ce qui est appelé les *sciences cognitives*<sup>1</sup>. Muni d'une technologie inconcevable il y a encore un siècle, ce nouveau mouvement, tendant à l'interdisciplinarité, reprend les questions fondamentales liées à la connaissance afin de leur apporter de nouvelles réponses en les reformulant pour les adapter au contexte de notre temps ou en les abandonnant si elles ne sont plus dignes d'intérêt.

Dans cette démarche ambitieuse, l'avènement de l'informatique a joué un rôle essentiel par la nouvelle conception des mécanismes de calcul, de raisonnement et de pensée qu'elle a introduits. Paradoxalement, l'ordinateur a également encadré et fortement dirigé les réflexions; les sciences cognitives, fortes de leurs expériences, en ont pris conscience et tendent à reconsidérer la place de l'informatique dans l'étude de la cognition.

Enfin l'intelligence artificielle (IA), la plus jeune des sciences cognitives, est née de la conjonction des préoccupations philosophiques et de la maturité technologique. Elle a, dans la seconde moitié du XXème siècle, stimulé la recherche et introduit de nouvelles interrogations liées aux capacités cognitives de systèmes artificiels construits par l'Homme.

## 1.2 Contexte

Des modèles partiels ou complets de systèmes complexes apparaissent aussi bien en sciences pures qu'en sciences humaines, selon que l'objet d'étude soit un système artificiel (artefact) ou un système vivant (organisme). Les sciences cognitives, de par leur intérêt dans les deux types de systèmes, sont particulièrement propices au développement des travaux de modélisation de l'intelligence, de l'autonomie et de la vie; les démarches interdisciplinaires sont de plus en plus fécondes et laissent entrevoir des développements importants pour les années à venir.

Le travail présenté dans ce mémoire est un *modèle d'agent autonome* engendré dans le cadre de l'IA. Notre aspiration a été d'élargir notre réflexion au cadre des sciences cognitives.

---

<sup>1</sup>L'expression "sciences de la cognition" est plus appropriée (comme on dirait sciences de la physique). Nous utiliserons malgré tout le terme plus concis, en nous référant généralement au sujet commun de ces sciences (la cognition) plutôt qu'à la fédération d'un ensemble de disciplines éhues.

Ainsi, les sources de réflexion liées au thème de l'autonomie ont été très diverses: d'artefacts rappelant certains insectes à des travaux en éthologie sur la fourmi ou le canard, en passant par la botanique ou la psychologie de l'enfant.

Par contre, nous avons précisément choisi le domaine d'application: il s'agit de la *robotique mobile*. Ainsi, lorsque nous parlons d'*agent*, nous signifions "un artefact doté de capacités de perception et d'action, un robot mobile en particulier". Ce domaine d'application nous a permis de valider le modèle proposé sur différentes plates-formes de robots mobiles.

### 1.3 Motivations et démarche

La recherche en IA poursuit essentiellement deux buts qui apparaissent très clairement en toile de fond de notre travail: l'un est scientifique (comprendre), l'autre est pragmatique (construire).

- Le but scientifique est d'enrichir notre compréhension de phénomènes tels que l'intelligence, l'autonomie ou la vie.

En tant qu'êtres vivants, nous observons et sommes menés à donner un sens aux phénomènes liés à la vie. En tant que chercheurs, nous émettons des hypothèses et construisons des modèles de ces phénomènes que nous validons en simulation ou sur des artefacts.

- Le but pragmatique est de construire de tels artefacts, exhibant certaines caractéristiques de ces phénomènes, afin de les rendre plus conviviaux, utiles et efficaces.

L'amélioration de la qualité de vie de la société en est certainement la perspective la plus louable, en marge d'applications plus déplorables et difficilement évitables.

Ces deux facettes sont complémentaires et fortement dépendantes; tout premier artefact est le fruit d'un modèle abstrait, résultat d'une première réflexion. Cette réflexion s'enrichit lors du processus de construction qui suscite de nouvelles questions et aboutit à un raffinement du modèle et à la construction de nouvelles générations d'artefacts. Le processus d'ensemble est cyclique et auto-enrichissant.

Notre travail de thèse est le fruit de plusieurs cycles de cette démarche globale.

### 1.4 Problématique abordée

Depuis l'apparition<sup>2</sup> de l'IA, la résolution de problèmes (et en particulier la génération de plans d'actions) y occupe une place privilégiée. Les algorithmes proposés dans ce domaine par l'IA dite *cognitiviste* démontrent des capacités de raisonnement global basées sur des représentations symboliques qui font d'une machine programmée une machine "intelligente" aux yeux de l'observateur. Néanmoins, malgré la variété des travaux réalisés dans ce domaine, les systèmes produits présentent de fortes limitations (temps de réponses prohibitifs, manque de robustesse aux données incertaines et de flexibilité face à l'imprévu) qui rendent impossible leur utilisation pour le contrôle de systèmes devant évoluer dans des environnements complexes et dans des conditions réelles. Nous pouvons dire que ces systèmes sont "déconnectés" du monde réel. Ils sont essentiellement utilisés dans des environnements de simulation, des jeux ou des mondes extrêmement simplifiés (comme le monde des blocs) facilitant une description symbolique.

Face aux limitations de l'approche cognitiviste (fonctionnelle et symbolique), les années 80 ont vu apparaître l'approche dite *comportementale*. Cette dernière assimile l'autonomie à la capacité d'évoluer dans un univers réel (dynamique, incertain, souvent inconnu, parfois hostile). Cette approche a bouleversé le monde de l'IA car elle excelle précisément dans les conditions

---

<sup>2</sup>On situe traditionnellement l'apparition du terme "intelligence artificielle" durant l'été 1956, lors de la conférence du Dartmouth College, Hanover, état du New Hampshire, USA. Les fondateurs de l'IA y étaient: John McCarthy, Marvin Minsky, Herbert Simon et Allen Newell.

## 1. Introduction générale

limites de la génération de plans d'actions; elle introduit de nouvelles architectures de contrôle liant la perception à l'action, ce qui permet, dans les cas extrêmes, d'agir par raisonnements locaux (simples, robustes et rapides) basés sur des représentations non-symboliques (proches à la fois du signal fourni par les capteurs et des commandes envoyées aux effecteurs). Malheureusement, ce qui fait l'originalité de cette approche, l'abandon de représentations symboliques globales permettant de raisonner sur des tâches à long terme, constitue également sa limite; les systèmes nés de l'approche comportementale passent en effet leur temps à réagir à leur environnement et sont donc essentiellement dirigés par ce dernier.

Les lacunes et surtout la complémentarité des deux approches rend naturelle l'étude de leur intégration dans un cadre plus large qui permette une nouvelle compréhension de l'autonomie et favorise ainsi la construction d'artefacts plus robustes, adaptables et polyvalents. C'est la problématique générale que nous abordons dans ce travail.

Notre acception de la notion d'autonomie est fortement liée à ce choix. Elle est basée sur les deux caractéristiques complémentaires qui ont tendance à s'exclure mutuellement: l'action située et le choix à long terme. De façon plus générale, l'activité et le raisonnement, le phénomène local et le phénomène global.

Ce désir d'intégration nous a mené à l'étude de deux domaines clés en IA et dans lesquels notre travail apporte sa contribution: les architectures de systèmes autonomes et la représentation des connaissances.

### 1.4.1 Architectures de systèmes autonomes

Un premier aspect du travail nous plongera dans les préoccupations de conception d'agents autonomes. Il s'agit, dans notre cas, d'étudier et valider une architecture de contrôle qui soit générale, qui permette l'intégration naturelle des approches cognitive et comportementaliste en conservant les qualités de l'une et de l'autre.

Pour cela, nous proposons une architecture en trois niveaux d'abstraction: physique, comportemental et cognitif. Le premier niveau englobe les constituants matériels de l'agent. Le second niveau regroupe les capacités sensorimotrices de l'agent et fournit les propriétés de l'approche comportementale (en particulier, l'aspect situé). Enfin, le troisième niveau englobe les capacités de gestion des connaissances et de décision. Il fournit les propriétés de l'approche classique (en particulier, l'aspect global, l'orientation à long terme).

Le mécanisme de contrôle offert par cette architecture fournit un outil à la fois simple et général au problème de la *sélection d'actions*<sup>3</sup>. Ce problème est central à la propriété d'autonomie.

### 1.4.2 Représentation des connaissances

Le deuxième aspect du travail aura une préoccupation sémiotique; nous traiterons de l'usage et de l'interprétation des signes dans notre choix représentationnel. En particulier, il s'agira de déterminer l'objet, le rôle et la nature de la connaissance d'un agent autonome.

Le cadre conceptuel dans lequel ces questions ont été abordées nous a mené à prendre pour seul objet de connaissance l'interaction monde-agent, ancrée sur les capacités comportementales de l'agent. Ce choix rejette toute référence à une "réalité objective" externe à l'agent. Nous adoptons une position non-objectiviste (et constructiviste) qui nous a permis d'aborder la cognition sous un angle insolite et prometteur. Concrètement, l'approche a permis d'extraire une représentation computationnelle de l'interaction sur laquelle viennent se greffer trois processus essentiels de la cognition: l'interprétation, l'apprentissage et la motivation.

Ces processus et leur dynamique font apparaître des capacités cognitives fondamentales à l'autonomie telles que l'auto-organisation, le choix incessant des bonnes hypothèses en éliminant

---

<sup>3</sup>Problème général dont Toby Tyrrell propose la définition suivante: "how to choose, at each moment in time, the most appropriate out of a repertoire of possible actions" [Tyrrell93].

le superflu (abduction) et la structuration continue des connaissances. Nous y reviendrons en détail.

Notre travail apporte donc sa contribution dans ces deux domaines: la conception et la représentation. Il nous a permis d'apprécier à quel point ils sont liés. Cette interdépendance apparaîtra au cours de l'exposé.

### 1.4.3 Remarque

Le projet ambitieux d'aborder à la fois les sujets de l'architecture et de la représentation se reflète dans la diversité des problématiques couvertes dans cette thèse. Notre travail s'étend sur trois axes directeurs. Il va

1. de la perception à l'action, en modélisant les boucles sensori-motrices produisant les comportements de l'agent,
2. de la sensation à la représentation, en proposant un modèle d'abstraction et de structuration des connaissances de l'agent,
3. enfin, de la modélisation à l'application, en développant le modèle et en le validant dans le cadre de la robotique mobile.

Chacun de ces axes représente un défi et est porteur d'intérêts scientifiques et technologiques à la fois.

Après avoir présenté la problématique abordée par ce travail, nous allons décrire notre approche en précisant la méthodologie adoptée et le cadre conceptuel dans lequel nous nous plaçons.

## 1.5 L'autonomie et ses multiples facettes

Qui, de nos jours, oserait avouer son incompréhension du terme autonomie? Pourtant, son sens est variable suivant le domaine dans lequel il est considéré; on parle par exemple de l'autonomie d'une voiture (rayon d'action), d'autonomie régionale (indépendance politique) ou d'autonomie biologique (viabilité).

En général, un système, qu'il s'agisse d'un individu social, d'un organisme biologique, d'un artefact ou du marché monétaire, est qualifié d'*autonome* s'il se donne sa propre loi, ses règles de conduite, par opposition à un système *hétéronome*, contrôlé de l'extérieur. C'est sous cette perspective générale que l'autonomie est devenue un sujet d'étude dans différentes disciplines des sciences cognitives.

La question centrale que nous nous posons est:

Quelles propriétés font qu'un agent soit ou non autonome?

Le fait d'aborder cette question sous deux points de vue différents, celui de l'observateur du système et celui de son concepteur, permet de donner un nouvel éclairage à la question.

### 1.5.1 Un point de vue externe à l'agent

L'appréciation du degré d'autonomie d'un agent est liée à un observateur particulier. Le point de vue est, dans ce cas, externe à l'agent. Le jugement dépendra du passé de l'observateur, de ses connaissances, de ses perturbations, de ses intentions.

En tant que spectateur, c'est ce point de vue externe, propre à l'observateur, que nous adoptons dans l'analyse des capacités de l'agent.

## 1. Introduction générale

### Les critères d'évaluation

Quels critères appliquons-nous dans notre jugement de l'autonomie?

Il serait illusoire de vouloir caractériser objectivement l'autonomie d'un point de vue externe à l'agent. Pourtant, son comportement global doit bien satisfaire certaines contraintes plus ou moins implicites aux yeux de l'observateur qui le qualifie d'autonome.

Dans le but de faciliter notre jugement, en tant qu'observateurs, nous proposons trois critères d'évaluation qui sont

- A. préserver (seul) son intégrité physique et énergétique [survie].
- B. satisfaire (seul) les tâches qui lui sont attribuées dans la société [rôle social].
- C. s'améliorer (seul) au cours du temps [évolution].

L'unique objectif des critères d'évaluation est de pouvoir juger du degré d'autonomie de notre agent<sup>4</sup>.

D'un point de vue externe, nous considérons que l'agent autonome est celui qui exhibe des comportements satisfaisant ces critères d'évaluation. Nous nous en servons régulièrement dans la suite.

### La survie

Le critère de *survie* est essentiel pour l'agent; il est peu probable que l'on qualifie d'autonome un agent qui n'évite pas les chocs ou qui ne prête pas attention à l'état de ses ressources énergétiques et qui, de ce fait, tombe en panne au cours d'une mission.

Malgré le caractère élémentaire d'un tel critère, cette première tentative de caractérisation permet d'illustrer le risque d'une telle démarche et de limiter l'application de ces critères d'évaluation à un agent artificiel et individuel (n'appartenant pas à une société d'agents). Le fait d'aborder des agents sociaux, par exemple, conduirait à considérer d'autres critères d'évaluation.

Le comportement altruiste<sup>5</sup> de certains insectes sociaux va par exemple à l'encontre du critère de survie. Pourtant, les fourmis et les abeilles sont de bons exemples d'organismes autonomes. A travers ce type de comportement particulier, l'individu semble se sacrifier, négliger son intégrité physique, pour la survie de la collectivité. Ceci peut être vu comme une marque d'autonomie plus large et que nous n'aborderons pas dans ce travail: l'autonomie collective.

### Le rôle social

Le critère lié au *rôle social* est un critère d'utilité par rapport à l'observateur du système. Un agent sera généralement conçu dans le but de réaliser un type de mission. Il faut qu'il puisse réaliser sa tâche par lui-même et qu'il démontre sa tendance à satisfaire ce pourquoi il a été construit.

L'IA, dans une volonté de contribution technologique, s'est généralement limitée à cet aspect utilitariste de l'autonomie. Pourtant, dans une perspective de compréhension du phénomène, ce critère est certainement le moins important des trois critères énoncés<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup>Nous parlerons de *survie*, *rôle social* et *évolution* dans le texte en gardant à l'esprit que cette terminologie est empruntée au monde du vivant et appliquée au monde de l'artificiel.

<sup>5</sup>*Altruisme*: Par opposition à l'égoïsme, l'altruisme correspond à un souci désintéressé du bien d'autrui. Des comportements altruistes sont observables dans certaines sociétés animales où l'individu semble aller jusqu'à sacrifier sa vie pour le bien (la survie) de la colonie.

<sup>6</sup>Sociologiquement, il reste néanmoins l'élément le plus conflictuel dans toute application d'automatisation robotique.

## L'évolution

La présence des deux premiers critères pourrait suffire à une caractérisation de l'autonomie. Or, le critère d'évolution est décisif.

Lorsque les conditions externes changent, que la nature de l'environnement est différente, l'observateur s'attend à ce que l'agent puisse s'adapter aux nouvelles conditions. Dès lors, ce critère est, dans une certaine mesure, un complément essentiel au critère de survie.

Enfin, précisons que le type d'évolution considéré ne porte que sur un individu; par conséquent, nous n'abordons que l'évolution ontogénétique<sup>7</sup> de l'agent.

### 1.5.2 Un point de vue interne à l'agent

Sous une perspective opposée, le phénomène d'autonomie est lié à la structure et à l'organisation interne de l'agent. Ce sont l'architecture et la dynamique interne qui font de l'agent ce qu'il est, indépendamment du fait d'être observé ou non.

En tant que concepteur, c'est ce point de vue interne que nous adoptons dans la démarche de modélisation.

#### Dynamique événementielle et dynamique structurelle

La question est ici: Par quelles lois internes sont contrôlés les comportements d'un agent autonome?

Cette question s'inscrit dans le cadre plus large de l'étude de l'origine des phénomènes qui peut être abordée de façons très variées. Les attitudes suivantes sont certainement deux extrêmes possibles:

- D'une part, le *causalisme* affirme que la cause d'un phénomène (le comportement autonome, par exemple) se trouve dans le passé; dans un système causal, l'état présent est l'effet de ce qui le précède et la cause de ce qui le suivra.
- D'autre part, le *finalisme* affirme que l'essence d'un phénomène est dans le futur; un système finaliste est organisé selon un plan, un but ultime et n'agit qu'en fonction d'une fin telle que la tendance à la perfection ou la volonté divine.

Ces deux attitudes se penchent sur l'aspect événementiel de la dynamique des systèmes sans s'intéresser à leur structure interne. Celle-ci est implicitement considérée comme étant donnée par avance et essentiellement figée. Ainsi, leur formulation ne tend pas à se prononcer sur une localisation de l'origine du phénomène comme étant externe ou interne au système. Ces approches conduisent à un déterminisme événementiel, dirigé de l'extérieur du système.

Par contre, les théories des systèmes et du vivant tendent à considérer la structure interne des systèmes; elles adoptent une position évolutionniste, portant explicitement sur la dynamique de cette structure. Dans cette attitude,

- le comportement est lié à certaines propriétés favorisant la viabilité du système. Ces propriétés (homéostasie, auto-production, capacité d'anticipation) émergent de l'histoire du système et évoluent avec elle.

Cette dernière position situe l'origine des phénomènes, qu'elle soit causale ou finaliste, au niveau de l'évolution de la structure interne dont la propriété décisive est sa co-évolution avec la dynamique du système dans son environnement. C'est de cette structure évolutive que découle la dynamique événementielle du système.

L'approche culmine dans la notion de téléonomie qui correspond à la "propriété directionnelle de l'organisation logique d'un système telle que tout changement semble viser une cible

<sup>7</sup> *Ontogenèse*: En biologie, l'ontogenèse couvre la série de transformations subies par l'individu depuis la fécondation de l'oeuf jusqu'à l'être achevé. La *phylogenèse*, elle, couvre l'évolution à travers les générations.

## 1. Introduction générale

dans le futur" [Schwartz92]. A tout instant, l'organisation interne d'un système téléologique est le résultat de son passé (causalité structurelle) et cette organisation contient l'objectif à long terme du système (finalité structurelle). Ainsi, la capacité d'anticipation, d'orientation vers un but (explicite ou implicite), est un héritage du passé, ancré dans la structure évolutive du système.

Ces différentes attitudes soulignent l'influence du passé sur le présent, la nécessité de maîtriser le futur pour éliminer les doutes du présent, enfin, l'importance de l'évolution structurelle dans le but de maintenir une viabilité sans cesse remise en question.

Ainsi, le modèle d'agent autonome se doit de considérer le passé, le présent et le futur à la fois; le passé est interprété, le présent est traité et le futur est anticipé par le système.

### Autopoïèse et autonomie

Différents modèles ont abordé l'autonomie d'un point de vue interne. Nous allons introduire celui proposé par Humberto Maturana et Francisco Varela qui est actuellement le modèle le plus complet et concis que nous connaissions.

L'autonomie est une propriété fondamentale des systèmes vivants. Elle constitue donc un sujet central en biologie. C'est en s'appuyant sur leurs études biologiques, mais dans la perspective des sciences cognitives, que Humberto Maturana et Francisco Varela ont proposé, depuis 1972, les concepts d'autopoïèse [Maturana-Varela72] et de clôture opérationnelle [Varela79] comme théorie générale des phénomènes liés à la vie et à l'autonomie.

Ces concepts sont construits sur la base de notions telles que l'auto-production, l'identité, l'interaction et l'organisation.

Plus précisément, les auteurs donnent la définition suivante de l'autopoïèse:

Un système *autopoïétique* est un système organisé en un réseau de processus qui produisent (transforment et détruisent) les composants qui:

- (i) régénèrent et réalisent continuellement, par leurs interactions et transformations, le réseau de processus qui les a produits; et
- (ii) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où ils existent (les composants), en spécifiant le domaine topologique où le système se réalise en tant que réseau.

En paraphrasant les auteurs, un système autopoïétique est donc une sorte de machine homéostatique<sup>8</sup> ayant la particularité de prendre pour variable à maintenir constante sa propre organisation!

Dans ce sens, une organisation autopoïétique implique un réseau de processus qui se constitue en tant qu'unité par le simple fait qu'il est régénéré par ses propres processus.

Enfin, la notion d'identité se résume à l'existence en tant qu'unité dans un espace délimité par le propre système. En effet, les auteurs affirment que chaque fois que l'organisation autopoïétique est réalisée en un système concret dans un espace particulier, le domaine de déformations auxquelles le système résiste sans perdre son identité tout en maintenant constante son organisation correspond au domaine des changements dans lesquels il existe en tant qu'unité.

---

<sup>8</sup> *Homéostasie*: Tendence générale d'un organisme qui vise à maintenir constantes les conditions d'équilibre de son milieu. Ce terme, emprunté à la physiologie, est synonyme d'auto-régulation ou auto-stabilisation en sciences exactes. Ainsi, tout système dont la sortie est stable et indépendante des variations de l'entrée est dit homéostatique.

Les travaux de la cybernétique ont montré qu'une boucle de rétroaction négative (liaison circulaire où la variation de la sortie va dans le sens opposé de celle de l'entrée) pouvait posséder la propriété d'homéostasie si elle satisfaisait certaines conditions de stabilité. Ainsi, bien que pour un observateur externe tout semble prouver que le système possède un but, une consigne ou une finalité qui est celle de maintenir sa sortie stable, en fait, seule la structure interne de ce système est l'origine de la propriété externe observable.

Cette digression permet de reconsidérer la précarité des explications tirées de l'observation et d'illustrer l'importance de la structure interne d'un système sur le comportement apparemment téléologique qu'il peut démontrer aux yeux de l'observateur externe.

Si l'autopoïèse aspire à expliquer les caractéristiques fondamentales de la vie, le concept de clôture opérationnelle aspire lui à caractériser la classe englobante des systèmes autonomes. Ainsi, d'après Varela,

un système est *opérationnellement clos* si son organisation est caractérisée par des processus:

- (i) dépendant récursivement les uns des autres pour la génération et la réalisation des processus eux-mêmes; et
- (ii) constituant le système comme une unité reconnaissable dans l'espace où les processus existent.

Cette notion insiste sur la dynamique auto-productrice interne au système. Pourtant, la propriété de clôture opérationnelle n'implique pas un isolement et une indépendance du système par rapport à son milieu. Les influences externes restent nécessaires, elles poussent le système à se restructurer de façon à rétablir son équilibre interne.

Dans ce sens, une organisation ouverte<sup>9</sup> (caractéristique d'un système allopoïétique<sup>10</sup>) produit autre chose que sa propre organisation. Les lois du système sont, dans ce cas, externes au produit du système. Par contre, si le produit est l'organisation du système lui-même, les lois de production sont inhérentes au produit. Comme le fait remarquer George Kampis [Kampis91], le produit du système est produit et producteur à la fois.

Ainsi, d'un point de vue architectural, la notion de clôture opérationnelle évite de percevoir l'agent autonome uniquement comme un système d'entrées-sorties et pousse à considérer l'évolution simultanée du système et de son environnement par de nouveaux types de couplages (voir [Deffuant92]).

Tout travail traitant d'autonomie se devrait de mentionner les concepts introduits par Maturana et Varela. Ils constituent un apport fondamental à la notion d'autonomie (biologique) et plus généralement à la réflexion et à la méthodologie dans le cadre des sciences cognitives.

En ce qui nous concerne, bien que la théorie de l'autopoïèse n'ait pas inspiré notre travail, elle en partage certaines des hypothèses de travail et la plupart des propriétés du modèle résultant.

## L'IA et l'autonomie

Nous allons maintenant nous intéresser à la notion d'autonomie telle qu'elle a été abordée en IA depuis les années cinquante. Le terme "autonomie" a successivement été synonyme de "capacité de raisonnement" dans le paradigme cognitiviste, puis de "capacité d'action" dans le paradigme comportementaliste. Ce n'est que récemment, dans le cadre des sciences cognitives, que l'autonomie a été abordée sous de nouvelles perspectives.

Nous allons introduire, en guise de préambule à notre architecture, les éléments-clés de notre approche interne à l'autonomie: l'activité, le raisonnement et leur intégration à travers la notion de *fonctionnalisation*.

**L'activité.** La nature intrinsèque de tout agent est l'action; il est plongé dans un environnement avec lequel il ne peut éviter d'interagir.

L'action d'agents en environnement réel (activité dans la suite) est devenue l'objet d'étude d'une partie de la communauté IA qui, tout en s'inspirant des sciences de la vie, a généralement adopté la robotique mobile comme domaine d'application. Ces travaux ont contribué à valoriser le paradigme d'*action située*<sup>11</sup> comme solution au problème de l'activité. Leur traitement de

<sup>9</sup>La systémique qualifie un système d'*ouvert* s'il échange de l'énergie et de la matière avec son environnement. Un système *fermé* n'échange que de l'énergie. Enfin, un système *isolé* n'échange rien avec son milieu (en fait, il n'en existe pas dans la nature; l'objet le plus "isolé" est certainement la bouteille Thermos).

<sup>10</sup>Antonyme d'autopoïétique.

<sup>11</sup>D'après Lucy Suchman [Suchman87]: "Actions taken in the context of particular, concrete circumstances".

## 1. Introduction générale

l'action, sous la forme de stimulus-réponse, est localisé dans l'espace et dans le temps; seul est traité l'environnement immédiat, observé à l'instant présent. Ce modèle d'action facilite notamment le traitement de l'imprévu lié à toute interaction avec un environnement.

Les travaux de ce paradigme ont invariablement débouché sur des systèmes sensori-moteurs, donnant lieu à des agents situés, souvent inspirés du monde animal (insectes en particulier).

**Le raisonnement.** Le raisonnement est, avec la représentation, le sujet central du paradigme cognitiviste. La résolution de problèmes (en particulier la génération de plans d'actions, plus proche des applications robotiques) se résume grossièrement à un processus de recherche dans un espace de solutions. Invariablement, les formalismes logiques utilisés et les fortes exigences formelles (consistance, complétude) imposées par l'IA cognitiviste font que la taille de l'espace de recherche croisse exponentiellement avec celle du problème traité. De ce fait, les programmes nés du paradigme cognitiviste s'épuisent à gérer l'explosion combinatoire à travers des heuristiques et des mécanismes de contrôle spécifiques. Enfin, la source d'inspiration des modèles du raisonnement est généralement l'Être Humain.

Malgré les déficiences des solutions proposées par ce paradigme (voir chapitre 2), le raisonnement introduit des capacités essentielles telles que l'explication (remémoration du passé), le choix entre différentes possibilités (traitement du présent) et la prévision (anticipation sur le futur).

Cette dernière capacité, l'anticipation, nous semble être une caractéristique essentielle à l'autonomie dans le sens où elle permet d'introduire une orientation à long terme, par opposition à la nature située des agents comportementaux.

**Activité et raisonnement: vers une intégration.** Les systèmes offerts par ces deux paradigmes - cognitiviste et comportementaliste - apparaissent opposés dans le schéma de la figure 1.1.

- Les agents situés maîtrisent l'activité dans des environnements réels mais possèdent de très (trop) faibles capacités de raisonnement (souvent nulles).
- Les programmes de planification démontrent de bonnes capacités de raisonnement mais sont essentiellement utilisés en simulation de par leur incapacité à satisfaire des temps de réponse raisonnables.

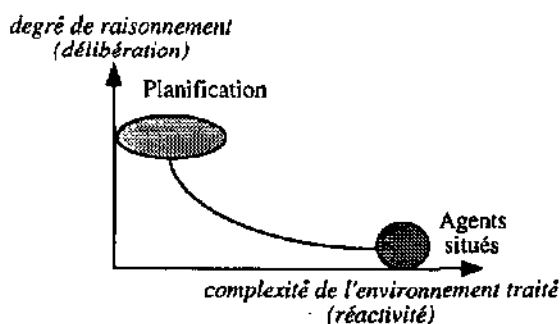


Figure 1.1 : Raisonnement et activité.

Les premiers systèmes sont situés (comportements causaux, réactifs), les seconds sont orientés-buts (comportements finalisés, délibératifs). Notre conviction est que l'intégration des ces deux propriétés apparemment antagonistes est, d'un point de vue interne, la base d'une propriété observable d'autonomie.

**La fonctionnalisation.** La notion de fonctionnalisation que nous allons spécifier aspire à intégrer les facultés d'activité et de raisonnement.

Dans le paradigme comportementaliste, une boucle sensori-motrice possède certaines propriétés intrinsèques, essentiellement liées à sa structure interne: on parle par exemple de réactivité, d'adaptabilité, d'homéostasie.

Par contre, dans le cadre du système qui l'englobe, la fonction réalisée par cette boucle sensori-motrice n'est pas une propriété de la boucle; cette fonction ne lui appartient pas, c'est le système englobant qui la suscite et l'exploite. Une autre boucle sensori-motrice, possédant d'autres propriétés, pourrait peut-être satisfaire la même fonction pour le système englobant.

Ainsi, d'un point de vue interne à l'agent, l'autonomie dépend de la faculté d'utiliser les propriétés des capacités d'action pour réaliser les fonctions essentielles à la satisfaction des critères d'évaluation (survie, rôle social et évolution). C'est là une aptitude à la fois élémentaire et générale qui nous paraît être essentielle à l'autonomie.

Dès lors, nous appelons fonctionnalisation *l'exploitation (choix et organisation) contextuelle et systématique des propriétés d'action par rapport aux critères d'évaluation.*

Tout choix de l'agent doit tendre à fonctionnaliser ses capacités en vue de satisfaire les critères de survie, rôle social et évolution, par un asservissement adéquat de l'activité.

Ainsi, si l'activité est le support de la fonctionnalisation, le raisonnement en est le moteur.

De plus, l'agent ne peut se limiter à un raisonnement à court terme, aussi bien dans le passé que dans le futur; ni la situation courante, ni une perspective à court terme ne suffisent. Il est important que l'agent puisse raisonner à moyen et long terme, pour prévoir l'effet de ses choix et accroître l'utilité de son activité. A travers la fonctionnalisation, le raisonnement introduit une faculté d'anticipation qui vient s'ajouter au caractère situé de l'activité.

Enfin, la fonctionnalisation n'étant qu'une loi d'organisation interne liée à un agent particulier, elle peut s'avérer adéquate ou non. Dans un cas l'agent sera viable et autonome, dans l'autre pas. D'un point de vue interne, l'agent autonome est donc celui qui parvient à *fonctionnaliser son activité de façon adéquate.*

**Une structure évolutive.** Nous avons avancé, en énonçant les critères d'évaluation, que la capacité de s'améliorer au cours du temps est une caractéristique importante de l'autonomie. D'un point de vue interne, l'agent doit pouvoir modifier sa structure logique en fonction des expériences vécues.

Le fait de pouvoir se restructurer permet à l'agent de maintenir sa cohérence interne, d'améliorer l'adéquation de sa fonctionnalisation et d'aspirer ainsi à une plus grande autonomie.

### 1.5.3 Discussion

Nous avons proposé une approche à l'autonomie selon deux points de vue: les critères d'évaluation d'un observateur externe et les capacités de fonctionnalisation et de restructuration, internes à l'agent.

Un modèle d'agent autonome est condamné à adopter un point de vue interne. Néanmoins, les critères d'évaluation restent le seul moyen pour juger l'autonomie de l'agent (adéquation de la fonctionnalisation).

Remarquons au passage la similarité entre notre notion de fonctionnalisation et la notion d'*enaction* proposée par Varela. En argumentant sur la "redécouverte du sens commun" face à l'objectivisme et le déterminisme du courant cognitiviste en IA, Varela écrit:

"La plus importante faculté de toute cognition vivante est précisément, dans une large mesure, de *poser* les questions pertinentes qui surgissent à chaque moment de notre vie. Elles ne sont pas prédéfinies mais *enactées*, on les *fait-émerger* sur un arrière-plan, et les critères de pertinence sont dictés par notre sens commun, d'une manière toujours contextuelle."<sup>12</sup> [Varela88]

<sup>12</sup>Les termes typographiés en italique le sont dans l'original.

## 1. Introduction générale

A travers la notion de fonctionnalisation, nous abordons la même problématique de choix contextuel en tenant compte des contingences du présent, des expériences du passé et de la nécessité de satisfaire les critères d'évaluation.

Ainsi, face aux difficultés rencontrées par la communauté IA dans la quête d'autonomie à travers la construction d'agents purement situés ou purement délibératifs, notre travail propose un modèle d'agent ayant la capacité de fonctionnaliser (orienter à long terme et de façon évolutive) une activité de nature située. Notre objectif est d'intégrer l'activité, le raisonnement et l'évolution dans la conception d'un agent autonome<sup>13</sup>.

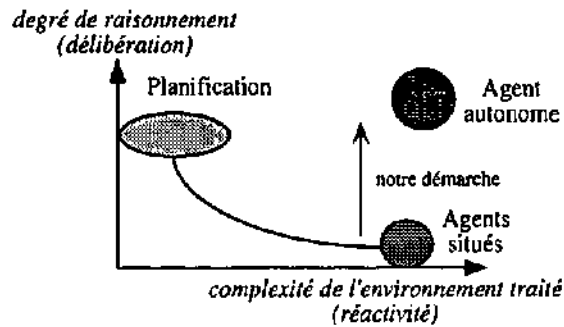


Figure 1.2 : Raisonnement, activité et autonomie.

Enfin, globalement, notre démarche consiste à considérer des capacités de représentation et de raisonnement sur la base d'un agent comportemental.

## 1.6 Cadre conceptuel

Tout ce qui suit repose sur la thèse d'une autonomie intrinsèquement liée à la capacité d'intégration de l'activité et du raisonnement.

Or, si d'un point de vue temporel, l'activité et le raisonnement semblent être antagonistes lorsque l'on pense à l'Être Humain<sup>14</sup>, cet antagonisme est renforcé lorsqu'on se situe dans le monde des systèmes artificiels; l'action et le raisonnement consomment tous deux du temps de calcul dans un programme d'ordinateur. Réaliser l'un empêche de réaliser l'autre, favoriser l'un défavorise irrémédiablement l'autre. Bien sûr, cet état de fait est fortement lié à l'architecture (von Neumann) des ordinateurs que nous utilisons. Néanmoins, malgré l'architecture "connexionniste" du système nerveux humain, l'Homme semble également subir cet antagonisme.

En conception de systèmes autonomes, la solution passe certainement par une parallélisation des mécanismes d'activité et de raisonnement mais cela ne suffit pas. Il faut, avant tout, simplifier aussi bien l'action que le raisonnement et surtout rapprocher ces deux phénomènes par une intégration adéquate. Il faudrait que l'on puisse dire "raisonner c'est agir et agir c'est raisonner". L'un des fruits de notre travail est de pouvoir avancer la version nuancée "raisonner c'est déjà agir et agir c'est déjà raisonner", comme si l'un amorçait l'autre et réciproquement, dans un processus global auto-catalytique et fortement imbriqué.

Au début de notre réflexion, aucun cadre conceptuel n'apparaissait explicitement mis à part ceux offerts par les deux courants exposés précédemment et qui sont ceux usités en IA: le cognitivisme et le comportementalisme. Néanmoins, au cours de l'élaboration, le plus souvent a posteriori, d'autres cadres conceptuels sont apparus.

<sup>13</sup>D'autres travaux ont récemment abordé une telle intégration. Nous en parlerons au chapitre 4.

<sup>14</sup>En effet, la plupart du temps on raisonne avant d'agir et on agit sans raisonner.

D'un point de vue architectural, notre travail se reconnaît dans le courant holistique par opposition au réductionnisme. D'un point de vue représentationnel, il se reconnaît dans le courant constructiviste par opposition au réalisme et à l'idéalisme.

Ces étiquettes épistémologiques se reflètent dans les méthodologies que nous adoptons en conception et en représentation: l'approche synthétique (par opposition à analytique) en conception, l'approche non-objectiviste en représentation. Quelques précisions s'imposent.

### 1.6.1 Architecture: holisme et synthèse

L'aspect architectural de notre travail adopte un point de vue holistique qui, méthodologiquement, débouche sur une approche synthétique.

La science occidentale repose traditionnellement sur de forts présupposés inspirés de la méthode cartésienne. D'un point de vue architectural, ces présupposés mènent de façon naturelle au réductionnisme; un système complexe est réduit à ses composants plus simples qui sont considérés comme étant fondamentaux par rapport au système global. A l'opposé, l'approche dite holistique propose de considérer et d'étudier les systèmes dans leur globalité; le centre d'intérêt devient l'interaction entre les parties, de même que l'interaction entre le système et son environnement.

Du fait de l'antagonisme activité-raisonnement et poussés par notre volonté d'intégration, c'est une vue d'ensemble que nous avons adoptée dans notre réflexion liée à la conception; afin d'étudier le phénomène général d'autonomie, nous avons "pensé" l'agent dans sa globalité.

L'approche est également holistique dans le sens de la règle "le tout est plus que la somme des parties". En effet, notre architecture est plus que la simple réunion d'une couche comportementale "agissante" et d'une couche cognitive "pensante". C'est la dynamique, le processus circulaire généré par l'intégration de ces couches, qui fait que l'on puisse observer des propriétés d'autonomie, du type "à la fois situé et orienté buts".

Il est d'usage en IA de différencier l'approche dite descendante (*top down*) de celle dite ascendante (*bottom up*) dans la modélisation de capacités intelligentes. La première est liée à la méthode d'analyse; on aborde un sujet complexe et on émet des hypothèses sur sa composition. La seconde est liée à la méthode de synthèse; étant donné un ensemble de composants, que peut-on déduire sur la totalité?

Dans le cadre des architectures, on parle souvent d'approche "délibérative", respectivement "réactive". Notre travail réunit les deux aspects: réactif dans l'action et délibératif par le raisonnement. Néanmoins, la démarche globale de ce travail a adopté une approche synthétique. Chronologiquement, nous avons formalisé les niveaux de l'architecture de bas en haut: physique, comportemental puis cognitif. Il s'agit là d'un élément essentiel de notre travail; ancrer le raisonnement dans les capacités d'action. C'est également l'ordre dans lequel nous décrivons l'architecture proposée.

### 1.6.2 Représentation: constructivisme et non-objectivisme

L'aspect représentationnel de notre travail adopte un point de vue constructiviste qui, méthodologiquement, débouche sur une approche non-objectiviste.

Les présupposés de l'épistémologie cartésienne apparaissent également au niveau représentationnel à travers l'approche réaliste; celle-ci proclame une réalité existante, objective, accessible et indépendante de l'esprit qui la perçoit. A l'opposé, le constructivisme<sup>15</sup> met l'accent sur le phénomène créatif de l'implication du sujet dans la représentation de la "réalité externe" et sur l'importance de la prise en compte de l'interaction du sujet avec son environnement.

<sup>15</sup> *Constructivism*: Thèse selon laquelle la réalité vécue par un individu, une société ou n'importe quel système connaissant, n'est pas l'image fidèle d'une réalité externe, mais est une construction propre au système, qui dépend aussi bien de la façon de communiquer du système que des propriétés de son environnement. Les précurseurs de ce courant ont été Husserl, J. Piaget et E. Schrödinger. Plus récemment, P. Watzlawick, E. von Glasersfeld, H. von Foerster, E. Morin, H. Maturana, F. Varela. [Schwartz92]

## 1. Introduction générale

Le courant constructiviste est à mettre en liaison avec la phénoménologie<sup>16</sup> ([Heidegger64], [Merleau-Ponty45]) ou l'approche dite *écologique* des travaux de J. J. Gibson<sup>17</sup> en vision. Ce dernier introduit la notion d'*affordance*<sup>18</sup> qui correspond aux potentialités d'action offertes par un objet ou une scène observés. Dans ce cadre, le sens d'un phénomène observé réside dans les potentialités qu'il offre à son observateur, les objets ne prennent sens que par ce qu'ils nous poussent à agir avec eux, pour eux ou en réaction à eux.

Le cadre conceptuel que nous avons adopté dans le problème de la connaissance de l'agent autonome s'est avéré être proche du constructivisme. Par opposition à l'approche réaliste, nous ne supposons pas une réalité externe objective qui, si elle existait, serait inaccessible à l'agent.

Cette position a dirigé notre travail sur la prise en compte de l'interaction monde-agent observée par l'agent lui-même. Cette méthodologie est dite non-objectiviste par opposition à l'approche objectiviste supposant des représentations "objectives", données a priori au système par un concepteur omniscient. De nos jours, la plupart des systèmes artificiels utilisent des représentations objectivistes, reflet de l'interprétation du concepteur ou de l'observateur du système au sujet d'une "réalité" supposée.

Cette prise de position non-objectiviste a, comme nous le verrons, des conséquences fondamentales sur la nature des connaissances qu'un agent peut acquérir, gérer et utiliser. Elle contraint également les processus cognitifs que l'on peut attribuer à un système autonome. Dans notre cas, ce choix a mené à nous intéresser aux trois processus d'*interprétation*, d'*apprentissage* et de *motivation*.

Ces choix conceptuels ont parfois demandé un effort intellectuel dans le sens où nous avons eu à combattre une quantité insoupçonnée de préjugés liés à notre interprétation des choses en tant qu'Être Humain (guidé par notre intuition) et en tant que scientifique (conditionné par la tradition cartésienne). Ce mémoire reflète certainement le besoin de déconditionnement que nous avons tenté de maintenir présent à notre esprit tout au long du travail.

Enfin, précisons que ces étiquettes épistémologiques ne sont qu'une tentative de situer, a posteriori, le point de vue adopté dans ce travail. En aucun cas elles n'ont été le moteur explicite de notre réflexion. De plus, nous n'y adhérons que dans la limite des connaissances restreintes que nous en avons. En particulier, elles ne constituent pas un outil par lequel nous prétendrions justifier les choix conceptuels ou méthodologiques faits dans ce travail.

## 1.7 Contributions

Notre contribution apparaît donc dans deux domaines clé de la conception d'agents autonomes: celui des architectures de contrôle (modèle et réalisation) et celui de la représentation des connaissances (nature de la connaissance, modèle, processus de traitement et réalisation). Cette contribution inclut également l'application du modèle au domaine de la robotique mobile.

### Architecture de contrôle

Cette thèse propose l'*architecture ARCO* (Architecture Réactive et Cognitive) comme modèle général de contrôle d'un agent autonome. ARCO est composée de trois niveaux d'abstraction: physique, comportemental et cognitif.

Cette approche modulaire s'accompagne d'une spécification précise et générale des interfaces liant fonctionnellement les trois niveaux d'abstraction. Elle détermine en particulier la nature des informations transitant entre ces différents niveaux. Ainsi, les deux niveaux inférieurs (physique et comportemental) s'échangent les données provenant des capteurs et les commandes destinées aux effecteurs. Ils permettent donc la réalisation de *boucles de contrôle*

<sup>16</sup> *Phénoménologie*: Étude philosophique des phénomènes qui consiste essentiellement à les décrire et à décrire les structures de la conscience qui les connaît.

<sup>17</sup> Pour une analyse minutieuse de l'oeuvre de Gibson, voir [Scaglione90].

<sup>18</sup> Howard Gardner propose la traduction "facilitation" [Gardner87].

*sensori-motrices* (comportements). Les deux niveaux supérieurs (comportemental et cognitif) s'échangent les données provenant des comportements (caractéristiques observées, états de stimulation) et les commandes de sélection comportementale. Ces deux niveaux permettent donc la réalisation de *boucles de coordination comportementale*.

La donnée d'un formalisme simple et général permettant de décrire les capacités comportementales de l'agent constitue un apport formel essentiel à la modélisation du niveau cognitif. Cette description se fait en termes de stimuli observables et de comportements stimulables. Elle permet de raisonner au niveau cognitif en termes d'états sensoriels observés et de comportements réalisés.

## Représentation des connaissances

En relation directe avec l'architecture proposée, notre travail se caractérise également par la proposition et l'utilisation d'une représentation dynamique de l'environnement perçu par l'agent en termes d'interactions sensori-motrices.

Cette représentation est construite par l'agent de façon incrémentale et située. Elle apparaît à deux degrés successifs de structuration: tout d'abord sous la forme d'un historique sensori-moteur représentant l'interaction expérimentée (vécue) par l'agent puis sous la forme d'un graphe sensori-moteur représentant indirectement la structure topologique de l'environnement en termes d'interaction sensori-motrice.

## Processus cognitifs

Notre contribution apparaît également à travers la proposition et l'intégration de trois processus cognitifs permettant d'interpréter, de structurer et d'exploiter les connaissances de l'agent.

La coordination adéquate de ces trois processus résulte en une capacité de fonctionnalisation susceptible de rendre l'agent autonome (aux yeux de l'observateur du système).

## Réalisation

Ce modèle général d'agent autonome a été développé dans le cadre du projet national PNR-23 et validé dans le domaine de la robotique mobile à travers des tâches de navigation. Les résultats ont été concluants, justifiant ainsi les prétentions du modèle.

## 1.8 Plan de thèse

Ce mémoire de thèse comporte 10 chapitres regroupés en deux parties: un état de l'art et notre approche de la modélisation d'un agent autonome.

La mise sur pied d'un état de l'art est une partie importante de tout travail de thèse. Nous avons pensé qu'il était important de garder une trace de ce travail; c'est l'objectif de la première partie du présent mémoire dont la lecture peut permettre au lecteur de s'imprégner des différentes problématiques liées à la modélisation et réalisation d'un agent autonome. Toutefois, ce chapitre introductif suffit à la compréhension de la deuxième partie du mémoire correspondant à une description complète de notre modèle d'agent autonome. Ainsi, le lecteur peut poursuivre sa lecture à partir de la seconde partie (page 87) et considérer la première partie comme un complément auquel il peut se référer ponctuellement.

Nous avons également voulu maintenir une même structure tout au long du mémoire. Ainsi, au risque d'introduire des redondances avec cette introduction générale mais dans le but de leur donner une consistance propre, chaque chapitre possède son introduction et sa conclusion. Une conclusion générale reprend l'essentiel, fait le bilan du travail et présente les extensions possibles et les perspectives de travaux futurs.

## 1. Introduction générale

### 1.8.1 Partie I: L'autonomie en IA; un état de l'art

C'est dans le cadre de l'IA, en tant que produit des préoccupations théoriques et technologiques de notre temps, que s'inscrivent les chapitres de cette première partie.

Les fondements ainsi que les travaux les plus représentatifs du courant cognitiviste en conception d'agents autonomes sont abordés au chapitre 2. Ce sont des travaux devenus classiques en IA. Nous y décomposons l'architecture fonctionnelle, commune à tous ces travaux, et le type de représentation des connaissances et de raisonnement rencontrés dans le domaine de la résolution de problèmes et de la génération de plans d'actions en particulier.

Le chapitre 3 passe en revue les travaux plus récents du courant comportementaliste. Nous en exprimons les fondements et la problématique avant de disséquer cinq types d'architectures génériques d'agents comportementaux.

Le chapitre 4 introduit le domaine des systèmes hybrides, dans lequel s'inscrit notre travail. La problématique liée à l'intégration de capacités d'activité et de raisonnement est énoncée par rapport à nos préoccupations architecturales et représentationnelles. Trois travaux récents, illustrant différents degrés d'intégration, sont présentés.

Cet état de l'art est structuré suivant un critère chronologique lié à l'aspect architectural de la modélisation d'agents autonomes. La succession des travaux fait également apparaître la chronologie liée à l'aspect représentationnel.

### 1.8.2 Partie II: Un modèle d'agent autonome

C'est dans le cadre de l'IA, en tant que discipline des sciences cognitives, que s'inscrivent les six chapitres de cette deuxième partie.

Après un bref rappel des concepts que nous venons d'introduire, le chapitre 5 décrit l'architecture ARCO. Il s'agit du modèle de conception que nous proposons comme solution au problème de la sélection d'actions. Les trois niveaux d'abstraction (physique, comportemental et cognitif), les dynamiques qu'ils supportent ainsi que les propriétés de l'architecture et son implantation distribuée y sont spécifiés.

Deux chapitres introduisent ensuite les couches inférieures (physique et comportementale) de notre architecture en introduction au modèle cognitif qui sera présenté dans les deux chapitres suivants (connaissance et processus cognitifs).

Ainsi, le chapitre 6 décrit les caractéristiques physiques de notre plate-forme robotique en mentionnant certaines analogies avec l'appareil sensori-moteur d'organismes vivants. Nous mentionnons les dangers mais également des apports conceptuels et méthodologiques pouvant résulter d'une telle comparaison.

La nature de l'activité considérée dans notre modèle est précisée au chapitre 7. Nous caractérisons le comportement et formulons un langage de description des capacités comportementales de l'agent. Nous terminons par un exemple simple qui permet d'illustrer l'approche à travers une application de navigation du robot mobile.

La connaissance du niveau cognitif est développée au chapitre 8. Dans un premier temps, nous exposons les concepts, la méthodologie et la position adoptée par ce travail. Nous explicitons ensuite la problématique abordée et décrivons la solution apportée. Nous terminons par relever certaines propriétés de notre approche représentationnelle et en évaluons la complexité d'un point de vue informatique.

Le chapitre 9 développe, sous les angles conceptuel et algorithmique, les trois processus cognitifs (interprétation, apprentissage et motivation) pour aboutir à la capacité de fonctionnalisation de l'activité, comme résultat de la coopération des processus cognitifs autour de la connaissance introduite au chapitre précédent.

Enfin, le chapitre 10 fait part des observations tirées de nos applications à la robotique mobile. Ces observations permettent de juger de l'autonomie de notre agent et de tirer un bilan de ce travail.

## *Modélisation d'un agent autonome*

## Partie I

# L'autonomie en Intelligence Artificielle

# L'autonomie par le raisonnement

## 2.1 Introduction

Si, de nos jours, l'autonomie n'est pas le thème central de l'IA, il l'était encore moins à ses débuts lorsque des chercheurs tels que Herbert Simon, Allen Newell, Marvin Minsky ou John McCarthy posaient les jalons de l'IA et de son courant cognitiviste, en particulier. A cette époque et jusqu'au début des années quatre-vingt, l'IA était loin de parler d'autonomie ou même de vie artificielle. Traditionnellement, la modélisation et la conception de systèmes artificiels ont étudié l'intelligence en tant que capacité de raisonnement, les compétences d'un système n'étant jugées qu'en termes de rationalité.

Cette tradition a porté ses fruits dans des domaines aussi divers que ceux de la théorie des jeux (avec le jeu d'échecs comme défi permanent), du traitement de langues naturelles (traducteurs automatiques, correcteurs grammaticaux) ou des systèmes experts. La robotique, et en particulier la robotique mobile, a également offert un domaine important d'applications et d'inspirations.

Ce premier chapitre commence par introduire les fondements et la problématique du courant cognitiviste. Tous deux procèdent des origines de l'IA et en partagent les hypothèses de base. Nous décrivons ensuite les contributions du courant cognitiviste dans le domaine de la conception d'agents autonomes. En particulier, nous développons l'architecture fonctionnelle proposée, ainsi que les méthodes de génération de plans d'actions dans le cadre du raisonnement symbolique. Enfin, nous récapitulons les apports et les limitations de cette approche.

En guise d'avertissement, si les travaux mentionnés dans ce chapitre sont précurseurs de la problématique abordée dans cette thèse, force est de constater qu'après plus de vingt ans de maturation, ils sont devenus classiques en IA. La problématique demeure toutefois intacte et le domaine reste largement ouvert. Beaucoup d'auteurs proposent, encore de nos jours et dans le même cadre cognitiviste, des améliorations des travaux initiaux.

## 2.2 Les fondements du courant cognitiviste en IA

L'approche cognitiviste s'inscrit dans le cadre de l'IA symbolique<sup>1</sup>. Elle repose essentiellement sur une hypothèse forte, souvent appelée *hypothèse symbolique* (le terme anglais de *Knowledge Representation Hypothesis* permet de mieux évaluer sa portée). L'hypothèse s'exprime comme suit:

**H1:** L'Intelligence peut être décrite comme une suite d'opérations sur des structures symboliques, interprétables de façon propositionnelle.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>D'un point de vue informatique, l'IA s'est longtemps caractérisée par le traitement et la combinaison de symboles. De nos jours, certains courants de l'IA, l'approche connexionniste en particulier, proposent des représentations dites sub-symboliques proches du traitement d'informations essentiellement numériques.

<sup>2</sup>La version donnée ici est tirée de [Haton91], p.20.

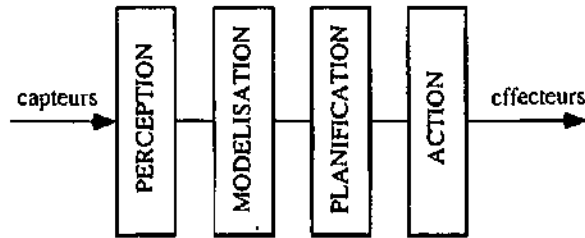


Figure 2.1 : Architecture fonctionnelle proposée par l'approche cognitive.

Cette prise de position audacieuse, prétendant que les théorèmes de la logique formelle sont les lois de la pensée, a souvent été critiquée (voir [Dreyfus72]). Nous nous limitons ici à l'énoncer et à la resituer dans le contexte scientifique et technologique des années cinquante.

Ce choix épistémologique est certainement le fruit du développement de la logique symbolique (Frege, Russel, Gödel et autres Church) entre 1850 et 1950. Pendant le siècle ayant précédé l'avènement de l'IA, les logiciens contribuèrent à l'exploitation de l'axiome qui veut que la pensée soit soumise à des lois et que la logique formelle permette de les décrire. L'IA symbolique se situe donc dans le prolongement de cette tradition logique. Se présentant initialement comme son domaine de validation, l'IA a, au cours du temps, suscité de longues discussions philosophiques sur ce principe<sup>3</sup>.

Rappelons également que l'hypothèse symbolique fut formulée et adoptée dans un contexte d'expansion technologique, liée à l'apparition de l'ordinateur. C'est dans ce cadre qu'elle a naturellement débouché sur la *métaphore computationnelle* qui considère les processus mentaux comme des systèmes de traitement de l'information (en particulier, des programmes informatiques) et le cerveau comme une sorte d'ordinateur. Ainsi, d'un point de vue architectural, l'approche cognitive soutient que

H2: l'intelligence est séparable de son support physique.

Ceci suppose l'existence d'un niveau d'abstraction dans lequel les processus mentaux peuvent être considérés indépendamment des mécanismes qui les engendrent.

La suite de ce chapitre va permettre de revenir sur le contenu et les conséquences de ces hypothèses, tant du point de vue architectural que représentationnel. Nous les retrouverons dans la conclusion.

## 2.3 L'architecture fonctionnelle

La métaphore computationnelle (H2) a permis aux fondateurs de l'IA d'extraire totalement les mécanismes du raisonnement de leur support physique. Cette prouesse a conduit à proposer une architecture fonctionnelle<sup>4</sup> de la pensée (ou du raisonnement dans un système intelligent); un ensemble de fonctions génériques bien déterminées, générales et stables, se succèdent dans le traitement de l'information allant de l'entrée à la sortie du système. Ces fonctions sont la perception, la modélisation, la planification et l'action.

Dans cette architecture, le module de *perception* est connecté aux capteurs du système. Il a pour tâche de distinguer la situation courante dans le monde externe et fournir au module de modélisation les données symboliques décrivant cette réalité externe.

<sup>3</sup> Voir [Searle83a], [Fodor86], [Lévy87].

<sup>4</sup> On parle parfois d'*architecture verticale* par opposition à l'*architecture horizontale* proposée par le courant comportementaliste que nous développerons au chapitre suivant.

## 2. L'autonomie par le raisonnement

La *modélisation* s'occupe de projeter et mettre à jour les connaissances du système sur une ou plusieurs représentation(s) interne(s). Le contenu de ces représentations porte essentiellement sur le monde externe et la tâche à accomplir.

Sur la base des représentations internes, le module de *planification* tente d'établir une suite d'actions permettant au système de réaliser sa tâche.

Enfin, le module d'*action* traite séquentiellement la suite d'actions fournie par la planification et contrôle en conséquence les effecteurs du système.

L'information est transmise séquentiellement de module en module et reste symbolique du début à la fin. Des terminologies différentes sont utilisées pour se référer aux étapes de cette boucle fonctionnelle de contrôle: Chris Malcolm parle de boucle "*sense-think-act*" [Malcolm90], Rodney Brooks de boucle "*sense-model-plan-act*" [Brooks91c].

Allan Newell, l'un des fondateurs et défenseurs du courant cognitiviste, voit dans cette architecture les avantages suivants:

- (i) Il s'agit d'une décomposition convenable et stable des fonctions devant être réalisées par un système intelligent.
- (ii) L'architecture est totalement indépendante de toute implantation particulière ou structure physique sous-jacente.
- (iii) Elle décompose la problématique de l'IA en différents sous-domaines, ce qui permet de définir des spécialités telles que la perception, la représentation des connaissances et la résolution de problèmes.

Le point (i) est une profession de foi que les chercheurs en IA ont longtemps tenté d'appuyer.

Le point (ii) s'inscrit parfaitement dans le cadre de la métaphore computationnelle. Il révèle également la volonté d'aborder le raisonnement dans sa généralité. L'IA cognitiviste abordera des problèmes généraux et tentera de proposer des techniques générales dans chacun de ces sous-domaines fonctionnels<sup>5</sup>.

Enfin, le point (iii) a déterminé la spécialisation dans les domaines encadrés par chacun des modules de l'architecture fonctionnelle. Le résultat des travaux approfondis dans chacune des spécialités doivent idéalement permettre de synthétiser l'intelligence par leur intégration ultérieure.

Il est à noter que, dans cette approche parcellaire, les modules centraux (modélisation et planification) ont accaparé l'attention et l'effort des chercheurs en IA. Cette adhésion s'est faite au détriment des modules d'interface (perception et action). Elle a défavorisé une approche globale qui, de nos jours, constitue un axe de recherche prometteur et dont notre travail se veut l'expression.

### 2.4 La représentation du monde

Le courant cognitiviste s'est confronté au problème de la représentation des connaissances d'un système capable de raisonner.

Trois questions sont apparues:

1. que doit-on représenter?
2. comment peut-on le représenter?
3. qui doit le représenter?

Les réponses au QUOI et au QUI sont uniques et précises dans le courant cognitiviste, alors que la réponse au COMMENT s'est traduite par un foisonnement de représentations symboliques différentes.

---

<sup>5</sup>Le "*General Problem Solver*" [Newell-Simon63] est l'un des produits les plus connus et caractéristiques de cette approche.

## Le quoi

C'est le monde, les objets qui le composent, leurs propriétés, l'environnement de travail, le milieu de l'agent, qui sont l'objet de la représentation. Invariablement, les symboles représentent une réalité externe au système.

De fait, du point de vue cognitiviste, pour qu'un système raisonne bien, qu'il puisse exhiber des traces d'intelligence, il faut que les symboles qu'il utilise soient le reflet du monde dans lequel il doit accomplir sa tâche.

La réponse étant donnée, d'autres questions apparaissent: Peut-on tout représenter? Comment délimiter le domaine de connaissances et sa granularité? Quelle est la correspondance entre le symbole et la réalité qu'il représente? Comment atteindre le sens des symboles?

Ces questions dépassent le cadre de l'IA qui se voit obligée de faire des choix. Ceux-ci apparaîtront dans la suite de l'exposé.

## Le comment

Ici également, la logique intervient en proposant le premier langage de description utilisé en IA. Les formalismes logiques (logique des propositions et logique des prédicats du premier ordre) offrent à la fois une syntaxe précise (termes, connecteurs, quantificateurs) et des mécanismes de raisonnement associés (modus ponens, modus tollens, résolution).

La connaissance du système est constituée par un ensemble de formules logiques satisfaisant la syntaxe. Le raisonnement consiste à manipuler ces formules suivant certaines règles pour en extraire de nouvelles et/ou en éliminer des anciennes.

D'autres formalismes sont venus enrichir la puissance d'expression des formalismes logiques pour exprimer, par exemple, des connaissances temporelles, hiérarchiques, incertaines ou l'héritage de propriétés.

En général, le choix d'une représentation symbolique est un compromis devant satisfaire des contraintes telles que

**la clarté:** la connaissance doit être codée et exprimée de façon claire. En général, le mode de représentation doit permettre à l'observateur du système d'interpréter les résultats fournis par ce dernier.

**la puissance d'expression:** la représentation doit permettre d'exprimer toutes les connaissances nécessaires au raisonnement utilisé pour résoudre un problème.

**l'utilisation efficace:** son traitement doit pouvoir être fait par des algorithmes de complexité acceptable et permettre un stockage des connaissances dans un espace (mémoire) limité.

Il est toujours difficile de trouver un compromis par le choix d'une représentation particulière. Il n'existe pas de représentation générale idéale. Ce choix dépend du type de connaissances à traiter pour un problème particulier (diagnostic, planification, reconnaissance) et du degré de contrôle que l'on veut exercer sur le raisonnement.

## Le qui

Pour compléter cette caractérisation des représentations du courant cognitiviste, il nous faut parler de l'auteur des représentations: le QUI.

En règle générale, et en partie à cause de l'importance réduite donnée aux modules d'interface de l'architecture fonctionnelle (perception et action), le système est vu comme un système d'entrées-sorties où

- les entrées sont données au système par le concepteur,
- les sorties sont données au concepteur par le système.

## 2. L'autonomie par le raisonnement

C'est donc le concepteur qui décrit le monde et interprète les solutions. Le système "se limite" à conduire le raisonnement symbolique.

Ce qu'il est important de retenir, c'est que la correspondance entre le symbole et ce qu'il représente n'apparaît qu'aux yeux du concepteur, de l'observateur du système. Comment pourrait-il en être autrement? En effet, la réponse au *QUOI* conduit naturellement à cette intervention du concepteur.

Cette question méthodologique (du *QUI*) prendra toute son importance dans la suite de notre exposé (chapitre 8, en particulier).

### 2.5 Le raisonnement en IA

Le raisonnement humain peut avoir différents objectifs tels que démontrer, expliquer, interpréter ou décider. Les éléments de connaissances sont également de nature très variée: énoncés verbaux, hypothèses, sensations, images mentales ou souvenirs.

La logique, et plus récemment l'IA, s'intéressent à modéliser les techniques de raisonnement et leurs stratégies.

Ainsi, on retrouve une grande partie de ces modalités en IA. Un agent doté de connaissances raisonne en produisant de nouveaux éléments de connaissance, afin de satisfaire la modalité recherchée sur la base des informations disponibles. Les éléments de connaissance sont ici des structures symboliques.

Dans le cadre des agents autonomes, le but du raisonnement consiste en grande partie à décider des actions de l'agent. C'est le domaine de la planification<sup>6</sup>.

En IA, la planification couvre deux problématiques: la génération de plans d'actions (quelles actions réaliser) et l'ordonnancement (quand les réaliser). Elles sont étroitement liées et parfois confondues, bien qu'elles utilisent des techniques différentes; la première nécessite des moteurs d'inférence et des connaissances sur le monde et les actions, la seconde consiste essentiellement à explorer judicieusement un graphe de recherche. La taille de celui-ci rend souvent prohibitive l'application des techniques classiques de recherche.

Nous allons développer la génération de plans d'actions proposée par le paradigme cognitiviste.

### 2.6 La génération de plans d'actions

Le module de planification est l'élément central du raisonnement dans l'architecture fonctionnelle. En conception d'agents autonomes, il correspond à la génération de plans d'actions (GPA dans la suite<sup>7</sup>) qui s'inscrit dans le cadre plus large de la résolution de problèmes.

La GPA fait l'objet d'une littérature aussi abondante qu'hétérogène. [Hendler-al.90] fournit une bonne compilation de ces travaux.

Deux d'approche ont été adoptées:

- l'approche générale qui consiste à rester indépendant du domaine d'application en offrant des techniques de raisonnement et de représentation générales,
- l'approche spécifique qui consiste à traiter un domaine d'application particulier en proposant des techniques propres à ce domaine et rarement applicables à d'autres domaines d'activité.

---

<sup>6</sup>Ce domaine de l'IA traite du problème de la construction automatique de plans d'actions à la place de l'utilisateur, homme ou machine. Il intervient dans des applications aussi variées que le contrôle d'agents autonomes, l'aide à la décision ou à la téléopération, la gestion de ressources, la construction et conduite d'ateliers flexibles ou la planification de missions spatiales.

<sup>7</sup>G valant aussi bien pour "génération" (le problème) que pour "générateur" (l'algorithme); le genre utilisé permettra de les distinguer.

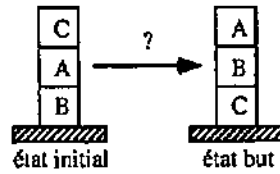


Figure 2.2 : Un problème dans le monde des blocs.

Nous allons définir le problème de la GPA dans l'approche générale et passer en revue les principales solutions proposées dans la littérature.

## Terminologie et définition du problème

Les connaissances utilisées en GPA portent sur le monde et sur les actions. Ces éléments de connaissance sont décrits par des formules logiques.

Toute action est décrite par un *opérateur* en termes de pré-conditions et de post-conditions. La *précondition* stipule les conditions d'application de l'opérateur. La *postcondition* stipule les changements introduits dans le monde par l'opérateur.

Un opérateur, s'il contient des variables dans sa spécification, représente une classe d'actions possibles; un opérateur instancié correspondant à une action primitive.

Enfin, un *problème* est caractérisé par la description d'un état initial et d'un état but. L'*état initial* spécifie la situation courante du monde. Le *but* spécifie l'état du monde désiré après l'exécution du plan. Dans certains systèmes, un but peut être décomposé en *sous-buts*, généralement plus simples.

Dans ce cadre, la GPA consiste à établir un plan (une succession d'opérateurs) qui soit une solution possible à un problème donné<sup>8</sup>.

Le monde dans lequel travaille le GPA est appelé *domaine d'application*. Le plus connu des domaines d'application est celui du *monde des blocs*.

Celui-ci est composé d'une table et d'un ensemble de formes géométriques nommées blocs. La table est de taille assez grande pour pouvoir y poser tous les blocs. Les problèmes liés à ce monde sont des passages entre différents empilements de blocs à l'aide d'opérateurs types, tels que "empiler" ou "déempiler".

## Problèmes représentationnels

Cette formulation générale de l'action sous la forme d'opérateurs a soulevé trois problèmes liés à la représentation des connaissances:

**Le *qualification problem*:** il est impossible de décrire de façon exhaustive l'ensemble des faits nécessaires à l'applicabilité d'un opérateur.

**Le *ramification problem*:** il est impossible de décrire de façon exhaustive l'ensembles des faits qui changent par l'application d'un opérateur.

**Le *frame problem*:** il est impossible de décrire de façon exhaustive l'ensembles des faits qui ne changent pas par l'application d'un opérateur<sup>9</sup>.

<sup>8</sup>Notons que la définition n'impose aucune contrainte d'optimalité. Un plan possible suffit, qu'il soit optimal ou non.

<sup>9</sup>En français, on parle du *problème de la rémanence*.

## 2. L'autonomie par le raisonnement

Le premier est lié à la notion même de précondition alors que les deux derniers s'intéressent à la validité d'une formulation de l'effet à travers la postcondition.

Du fait de l'incomplétude des connaissances, la GPA adopte généralement l'*hypothèse du monde clos* pour résoudre partiellement ces trois problèmes. Elle consiste à dire que les connaissances qui ne sont pas déclarées comme vraies dans une formule sont considérées comme étant fausses. Ainsi, les éléments de la réalité externe qui ne sont pas représentés dans la postcondition d'un opérateur sont censés rester invariants lors de la réalisation de l'action correspondante. On suppose donc que le système est omniscient.

### La représentation STRIPS

STRIPS, comme la plupart des GPA, est à la fois une représentation (langage) et un mécanisme de contrôle (algorithme). Le formalisme STRIPS est le plus utilisé en GPA. Les autres formalismes correspondent essentiellement à des enrichissements de STRIPS par l'adjonction d'informations de différentes natures permettant la gestion du temps, de l'incertitude ou des conflits.

Dans STRIPS, chaque état du domaine d'application est représenté par une formule logique tirée du calcul des prédicats du premier ordre (conjonction de faits). L'état initial du problème de la figure 2.2 peut être décrit par la formule

[SUR-TABLE(B) et SUR(A,B) et SUR(C,A) et LIBRE(C)]

De la même façon, il est possible de décrire l'état but ou tout autre état du monde par une conjonction de faits.

Les opérateurs sont décrits par trois formules. La *précondition* donne les conditions d'applicabilité. L'*add-list* et la *delete-list* forment la postcondition de l'opérateur. Elles décrivent les effets de l'application de l'action sur l'état du monde; quels faits deviennent vrais et quels faits ne le sont plus. C'est la solution partielle que STRIPS apporte au *frame problem*.

Nous voyons apparaître l'hypothèse du monde clos dans la description de ces opérateurs.

Dans le domaine du monde des blocs, trois opérateurs peuvent être introduits:

PRENDRE(X)	POSER(X,Y)	TRANSPORTER(X,Y)
prec: LIBRE(X) SUR(X,Y)	prec: SUR-TABLE(X) LIBRE(X) LIBRE(Y)	prec: LIBRE(X) LIBRE(Y) SUR(X,Z)
del: SUR(X,Y)	del: SUR-TABLE(X) LIBRE(Y)	del: SUR(X,Z) LIBRE(Y)
add: SUR-TABLE(X) LIBRE(Y)	add: SUR(X,Y)	add: SUR(X,Y) LIBRE(Z)

Les opérateurs PRENDRE et POSER permettent de passer un cube du sommet d'une pile à la table et inversement. L'opérateur TRANSPORTER permet de passer directement un cube du sommet d'une pile au sommet d'une autre pile.

L'espace des états lié au problème de la figure 2.2 est représenté sous la forme d'un graphe dans la figure 2.3.

Les états se retrouvent dans les sommets alors que les arcs représentent les opérateurs. On peut facilement extraire un plan solution dans ce graphe: [PRENDRE(C), PRENDRE(A), POSER(B,C), POSER(A,B)]. C'est le plan optimal (en nombre d'opérateurs), mais une infinité d'autres solutions sont possibles.

### Les techniques de résolution de problèmes

Etant donné un formalisme de description, le GPA doit raisonner, calculer une solution au problème. Pour cela, la GPA emprunte des techniques classiques de résolution de problèmes aussi bien dans les directions de parcours que dans les stratégies de recherche.

## Modélisation d'un agent autonome

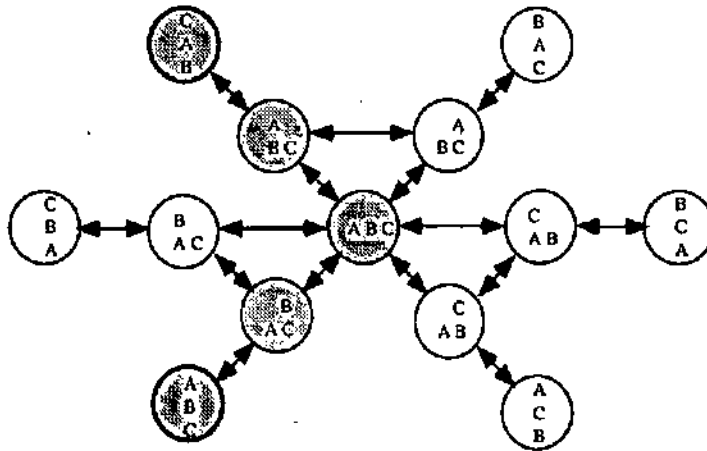


Figure 2.3 : Représentation de l'espace de recherche lié au problème du monde des blocs à trois cubes.

Les GPAs suivent l'une des deux *directions de parcours* (on parle de chaînage) offertes par les algorithmes classiques de parcours en informatique.

**Chaînage avant:** recherche en partant de l'état initial. Il s'agit, à chaque pas de l'algorithme et jusqu'à l'obtention de l'état but, d'établir l'ensemble des actions applicables à l'état courant, de générer les états résultant de leur application (postconditions) et de choisir le nouvel état courant.

Cette application récursive des opérateurs "en avant" est appelée *projection temporelle*. La technique est parfois utilisée pour vérifier si un plan est une solution du problème posé.

**Chaînage arrière:** recherche en partant du but. Il s'agit, à chaque pas de l'algorithme et jusqu'à l'obtention de l'état initial, d'établir l'ensemble des actions qui pourraient provoquer l'état courant, de générer les états contenant les conditions d'applicabilité de ces actions (préconditions) et de choisir le nouvel état courant.

Cette application récursive des opérateurs "en arrière" est appelée *régression*. C'est la direction de parcours utilisée par le mécanisme STRIPS.

De même, les différentes *stratégies de parcours* proposées par les techniques de recherche sont utilisées en GPA:

**En profondeur d'abord:** exploration d'un chemin aussi profondément que possible avant d'en essayer un autre. Cette stratégie est efficace mais ne garantit pas de pouvoir trouver une solution; appliquée à un graphe, elle peut tomber dans des circuits et ne jamais terminer (des techniques de traitement des circuits sont néanmoins connues). Dans le cas où une solution est trouvée, celle-ci n'est pas forcément optimale (nous avons vu qu'en planification, ce n'est pas nécessaire).

**En largeur d'abord:** exploration exhaustive de tous les chemins, en avançant par générations successives. Cette stratégie est coûteuse mais elle garantit l'obtention du meilleur chemin menant à la solution.

**Le meilleur d'abord:** utilisation d'une fonction d'évaluation locale permettant d'évaluer la distance entre un état quelconque et la solution afin de choisir quel chemin suivre en priorité, parmi l'ensemble des chemins possibles.

## 2. L'autonomie par le raisonnement

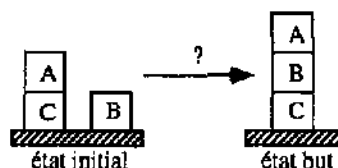


Figure 2.4 : Cas de figure conduisant à l'anomalie de Sussman.

Les algorithmes d'IA utilisent généralement la stratégie du meilleur d'abord<sup>10</sup> en appliquant des *heuristiques*<sup>11</sup> permettant d'évaluer localement la notion de meilleur voisin selon certains critères dépendants du problème traité. La stratégie utilisée dans STRIPS consiste à choisir les opérateurs permettant de réduire la différence entre le but et l'état initial du problème.

Intuitivement, tout opérateur possédant une partie du but dans son *add-list* et dont la précondition est aussi ressemblante que possible à l'état initial est un bon candidat pour réduire cette différence. De même, ayant trouvé un opérateur permettant de satisfaire le but, toute action qui réalise une partie de sa précondition est, à son tour, une bonne candidate. L'application successive de cette stratégie permet d'aboutir à une action dont la précondition est contenue dans l'état initial. Le plan est alors trouvé.

Il est aisé d'imaginer ce mécanisme de résolution dans le cas de l'exemple donné en figure 2.2.

Le processus de GPA n'est pourtant pas toujours aussi simple et bien des complications peuvent apparaître. L'*anomalie de Sussman* illustre l'une d'elles. C'est un exemple riche en conséquences. Considérons le problème décrit par la figure 2.4.

Le but est donné par la formule

$$[\text{SUR}(\text{A},\text{B}) \text{ et } \text{SUR}(\text{B},\text{C}) \text{ et } \text{SUR-TABLE}(\text{C})]$$

L'algorithme STRIPS, par exemple, essaie de satisfaire les faits composant le but dans l'ordre dans lequel ils apparaissent. Le premier pas de l'algorithme placera donc le bloc A sur le bloc B. Ainsi, le premier fait de la formule décrivant le but sera satisfait. Pourtant, toute tentative de satisfaire le deuxième fait - SUR(B,C) - détruira le premier que nous venons de satisfaire. C'est une situation typique de conflit entre deux sous-buts où la résolution de l'un conduit à la destruction de l'autre. De tels conflits peuvent avoir deux conséquences par rapport à la solution fournie:

- soit le planificateur entre dans une boucle infinie en essayant de résoudre un sous-but qui est toujours détruit ultérieurement,
- soit il détecte cette boucle et en sort, mais le plan fourni est excessivement complexe (suites d'actions s'annulant).

Différentes solutions à ce problème ont été proposées par des systèmes de GPA tels que RSTRIPS ou WARPLAN [Warren74]. L'idée est de protéger les sous-buts satisfaits et d'empêcher tant que possible de réaliser toute action susceptible de les détruire.

Le problème étant essentiellement lié à l'ordre arbitraire de résolution<sup>12</sup>, certains auteurs ont proposé le traitement d'actions partiellement ordonnées à la place d'un ordonnancement

<sup>10</sup>Egalement appelée "méthode des fins et des moyens" (de l'expression anglaise *means-ends analysis*). Le système GPS fut le premier à introduire cette méthode heuristique.

<sup>11</sup>"Procédure explicite de tentative de résolution d'une classe de problèmes donnée dont les conditions de convergence ne sont pas établies" [LeMoigne86, p.358].

<sup>12</sup>En effet, dans l'anomalie de Sussman, aucun ordre de traitement n'est imposé par l'énoncé du but et une inversion de cet ordre (ou des faits exprimant le but) éviterait l'apparition du conflit.

linéaire tel que celui proposé par STRIPS. L'une des conséquences de cette nouvelle démarche a été de porter le raisonnement au niveau du plan en tant que structure manipulable dans sa totalité (recherche dans l'espace des plans), au lieu de raisonner au niveau des états intermédiaires (recherche dans l'espace des états).

Cette évolution des GPAs fut introduite par Sacerdoti en 1975 à travers son système NOAH [Sacerdoti77]. Le système TWEAK [Chapman87b] est le fruit d'une étude théorique de cette approche. L'idée de base est d'éviter tout ordonnancement des buts et des opérateurs tant que cela est possible; c'est le *principe de moindre compromission*.

Le système NOAH combine trois concepts:

**La planification non-linéaire:** ne pas forcer l'ordre de résolution entre deux sous-buts tant que cela n'est pas nécessaire.

**L'espace des plans:** introduire un ensemble d'opérateurs qui ne représentent plus des actions dans le monde mais des transformations de plans partiels, soit en éliminant un conflit, soit en réalisant un sous-but.

**La planification hiérarchique:** réduire la complexité du processus de recherche en résolvant tout conflit à un niveau de description éliminant les détails superflus, avant de raffiner le plan.

L'une ou l'autre de ces caractéristiques a généralement été reprise par les GPAs apparus ultérieurement.

## Autres approches

De nombreux travaux sont venus se greffer sur ceux que nous avons exposé ici. Ces travaux viennent souvent compléter les travaux de base, sans toutefois introduire de nouveaux éléments marquants. Les améliorations portent essentiellement sur

- la représentation des opérateurs,
- la prise en compte du temps,
- la prise en compte de l'imprévu,
- les mécanismes de contrôle.

Bien que la représentation STRIPS soit la plus utilisée, le formalisme de base apparaît souvent enrichi de nouvelles informations permettant des raisonnements plus fins et profonds. Ainsi, plusieurs systèmes permettent de lier aux opérateurs des méthodes codées (procédures) afin de faciliter la résolution des buts ou l'ordonnancement des actions dans le plan: c'est le cas notamment pour les tâches dans NONLIN [Tate77] (utilisé dans le contrôle de turbines électriques) et dans SIPE [Wilkins83] (appliqué à l'élaboration de missions aéronautiques).

D'autres systèmes permettent de raisonner sur des ressources limitées. Ces raisonnements tiennent également compte du temps. De tels exemples apparaissent dans le système SIPE qui introduit la notion de ressources partagées et permet leur allocation. Le système DEVISER [Vere83] spécifie un intervalle temporel sur les buts et les actions et tient compte d'événements externes et de leur date d'apparition.

Plus récemment, les travaux en GPA ont abordé des problèmes réels et ont fourni des systèmes plus dynamiques introduisant des informations sur le temps d'exécution des opérateurs [Firby87]. D'autres se sont intéressés à assurer des temps de calcul pour des problèmes de temps-réel [Kaelbling88]. Certains prévoient des postconditions différentes en fonction du succès ou de l'échec de l'exécution de l'action.

Enfin, voulant trouver un compromis entre la précision du plan fourni par le planificateur et son temps de réponse, certains auteurs ont donné naissance au sous-domaine de la *planification*

## 2. L'autonomie par le raisonnement

réactive [Firby87], [Georgeff-al.86], [Ow-al.88]. Un planificateur réactif est censé construire ou modifier ses plans en cours d'exécution, en réponse à des situations changeantes dans le monde.

La *planification opportuniste* utilise un compromis entre le chaînage avant et le chaînage arrière. Elle adopte, en partant d'un état intermédiaire, l'une ou l'autre des directions de recherche en fonction de critères variables ayant pour but de déterminer l'opération qui réduit au maximum les indéterminations (instanciation de variables, contraintes temporelles). MOLGEN [Stefik81] en est l'exemple le plus connu mais passablement de planificateurs l'utilisent, sans que ce soit là leur caractéristique principale.

Enfin, le domaine de l'IA Distribuée (IAD) s'est intéressé à la décentralisation de la GPA dans le but de rendre les traitements plus flexibles et performants; dans ces systèmes, les connaissances et l'expertise sont décentralisées. Les sous-problèmes sont traités (idéalement en parallèle) par des processus experts. La négociation, la collaboration, l'interaction, les protocoles de communication sont autant de sujets traités par ce domaine (voir [Demazeau-Müller90, Demazeau-Müller91, Demazeau-Werner92]).

Au niveau des mécanismes de contrôle, les GPAs utilisent différents types de retour-arrière, des heuristiques et la méta-planification.

Le retour-arrière est une technique de contrôle classique. Lorsqu'un choix doit être fait dans le processus de recherche, l'une des possibilités est choisie et les autres sont mémorisées. Si le plan ne peut pas être étendu dans une direction particulière, un échec est signalé. On choisit alors une possibilité parmi celles gardées en mémoire.

Différents types de retour-arrière sont possibles. Le plus courant est le retour-arrière chronologique (on choisit l'option laissée de côté la plus récemment). Les systèmes WARPLAN, INTERPLAN [Tate75] et SIPE l'utilisent. Un autre type de retour-arrière est nommé *dependency-directed*; il consiste à revenir non pas jusqu'au dernier point de choix mais jusqu'au choix responsable de l'échec. Ce mécanisme demande des techniques permettant de lier l'échec à sa cause.

Une heuristique est souvent utilisée par les algorithmes de recherche sous la forme d'une fonction permettant de calculer l'adéquation des choix à faire et déterminer ainsi un ordre parmi les possibilités qui se présentent. INTERPLAN et NONLIN proposent des heuristiques spécifiques à leur traitement. Nous avons vu comment STRIPS utilise la stratégie des fins et des moyens.

Toute heuristique est dépendante du domaine d'application. On en trouve surtout dans le monde des blocs. Elles sont généralement difficiles à exprimer pour des applications présentant un intérêt pratique (autres que les jeux).

En planification distribuée, les différents processus experts communiquent soit explicitement et directement par des canaux de communication point à point, soit implicitement et indirectement à travers un tableau noir (blackboard) centralisateur.

Un mécanisme de contrôle important est celui de la méta-planification; il consiste à raisonner non seulement sur le problème posé mais également sur les techniques disponibles pour engendrer un plan. C'est en quelques sortes une planification du processus de planification.

Le système MOLGEN utilise un GPA standard pour son domaine d'application: la synthèse en génétique moléculaire. Le méta-niveau permet de sélectionner l'ensemble des opérateurs sur lesquels travaille le GPA pour ses modifications de plans.

Le système PRS [Georgeff-Lansky87] utilise une représentation procédurale des plans (algorithmes) sous forme de domaines de connaissances (*Knowledge Area* ou KA). Une KA définit un comportement particulier du système liant la perception à l'action. Un interpréteur décide de la KA à activer en fonction de la situation et des contraintes temporelles. Ce système peut être considéré comme un méta-planificateur du fait que certaines de ces KA sont des méta-connaissances facilitant l'optimisation des choix à faire. Il a été utilisé pour la conduite d'un robot autonome.

Dans ces deux systèmes, le méta-niveau est très différent du niveau de base. Ce n'est pas le cas dans le système SEAN, mentionné par Chapman [Chapman87b], qui utilise une copie du planificateur du domaine en tant que méta-planificateur. Ce méta-planificateur est à son

b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S(b)	1	3	13	85	561	5911	49'813	689'193	8'156'305	> 10 <sup>8</sup>

Table 2.1 : Complexité du monde des blocs en nombre d'états.

tour contrôlé par un nouveau méta-méta-planificateur identique et ainsi de suite! Il semble que ce système n'aie jamais été implanté. Il s'agit néanmoins d'un système dont la description fait entrevoir des propriétés intéressantes (récurrence, réflexivité).

## Les GPAs et les techniques offertes par d'autres disciplines

Un GPA peut être vu comme un *algorithme de recherche* d'un chemin entre deux sommets dans une structure de graphe. Les opérateurs portés par les arcs du chemin constituent le plan recherché. Or, l'informatique offre différents algorithmes généraux de recherche de chemins dans des structures de graphe [Dijkstra59], [Johnson77]. Dans ce cas, pourquoi construire des GPAs?

Les algorithmes de recherche sont appliqués à des graphes donnés explicitement. Il faut donc, soit les générer automatiquement, soit les spécifier à la main. Ceci est possible pour des problèmes simples, dont on connaît tous les éléments à l'avance. Malheureusement, la résolution de la plupart des problèmes aboutit à des structures énormes rendant prohibitive leur construction. C'est ce qu'on appelle l'*explosion combinatoire*.

La figure 2.3 représente le graphe à 13 sommets correspondant à un problème du monde des blocs en considérant 3 blocs uniquement. On peut donc le construire sans trop d'efforts. Pourtant, pour un problème de ce genre, l'espace des états croît exponentiellement avec le nombre de blocs considérés.

La table 2.1 confirme l'impossibilité d'utiliser des techniques classiques de recherche pour ce genre de problèmes. Elle donne le nombre  $S$  de sommets du graphe en fonction du nombre  $b$  de blocs considérés. En ne considérant que 8 blocs, le graphe d'états possède déjà plus de 500'000 sommets!

Les GPAs ont la particularité d'utiliser des heuristiques. Elles permettent de restreindre les espaces de solutions afin de les parcourir plus efficacement<sup>13</sup>. Dans le système STRIPS, par exemple, le graphe est donné implicitement à travers la description des opérateurs. Il n'est construit que pendant le parcours, en limitant le nombre de sommets visités.

Les GPAs permettent donc, en plus d'un traitement de données symboliques, de réduire la combinatoire du problème par l'utilisation d'heuristiques adéquates.

La GPA peut être vue également comme un *problème d'optimisation sous contraintes*. Ces contraintes sont parfois contradictoires. Or, la recherche opérationnelle offre des algorithmes classiques pour ce genre de problème (en programmation linéaire, algorithmes du simplexe et de Khachian [Dodge87]). Ces solutions peuvent néanmoins être améliorées: les GPAs permettent de diversifier le type de contraintes intervenant (symboliques, par exemple) ou d'offrir des solutions non-optimales dans des temps inférieurs à ceux des algorithmes classiques<sup>14</sup>.

## Langages et outils de développement des GPAs

En IA, les langages de programmation ont généralement été les promoteurs des succès les plus significatifs. Ceci est particulièrement vrai en GPA.

Les langages traditionnels de l'IA (LISP et PROLOG) ont été le premier support des algorithmes de GPA. LISP (acronyme de *list processing*) fut le premier langage permettant de

<sup>13</sup> Il est à noter que le problème général de la génération de plans d'actions reste de complexité exponentielle. Chapman a montré, à travers son système TWEAK, qu'il peut, dans des circonstances très précises qui ne sont pas celles rencontrées dans la majorité des problèmes, être réduit à une complexité polynomiale.

<sup>14</sup> Voir [Ghedira93] pour un autre type d'optimisation basé sur la technique du recuit simulé.

## 2. L'autonomie par le raisonnement

programmer sans embûche des tâches de résolution de problèmes, grâce à son degré d'abstraction et à ses nouvelles propriétés (interprétation, récursivité, hiérarchie, contextes). Il continue d'être le langage le plus utilisé en IA. PROLOG a considérablement marqué le domaine de la GPA par son mécanisme de contrôle intégrant le retour-arrière chronologique. Il est à la base de la plupart des GPAs classiques. Son descendant, Prolog III, permet d'associer à des règles un ensemble de contraintes et intègre un mécanisme de propagation de ces contraintes. Cette technique facilite la réduction de l'espace de recherche.

Enfin, malgré la généralité de ces langages, la plupart des GPAs ont proposé de nouveaux langages spécialisés, intégrant les mécanismes qui leur sont propres.

## 2.7 Conclusion

L'approche cognitive en modélisation et conception d'agents autonomes est celle de l'IA traditionnelle. Elle en partage les fondements (hypothèse symbolique et métaphore computationnelle) et la problématique (en ce qui concerne l'aspect représentationnel: le QUOI, le COMMENT, le par QUI représenter).

Le cognitivisme réduit l'autonomie à la capacité de raisonnement. Dans ce cadre, il propose l'architecture fonctionnelle comme modèle de la pensée raisonnante. Comme support au raisonnement il offre des représentations

- réalistes (objectivistes), portant sur un monde externe,
- essentiellement tirées de formalismes logiques, et
- construites et interprétées par le concepteur du système.

Les apports de ce courant sont ceux de l'IA traditionnelle: mécanismes variés et robustes de raisonnement et outils de représentations. Il a le mérite d'avoir abordé des thèmes essentiels tels que le temps, la causalité, la distribution du raisonnement et des représentations.

Pourtant, dans une perspective de modélisation et conception d'agents autonomes, l'approche cognitive présente différentes lacunes. Sur le plan architectural:

- Sa décomposition fonctionnelle a conduit à focaliser les recherches sur certaines parcelles du traitement (le raisonnement) au détriment de l'intégration des fonctions d'interface (perception et action).

Cette approche partielle n'est pas innocente et trahit

1. la complexité inhérente aux problèmes de perception (vision, en particulier) et d'action (contrôle, en particulier),
2. le poids des contraintes introduites par l'hypothèse symbolique (H1) dans une démarche d'intégration des fonctions d'interface (perception, action) avec un système manipulant des représentations symboliques.

Méthodologiquement, cette approche focalisée se traduit par une absence totale de considération de l'interaction du système avec son environnement.

- Dans ce séquençage du traitement fonctionnel, un raisonnement monolithique précède l'action.

Ceci conduit à une planification *off-line* qui, ajoutée à une complexité exponentielle des algorithmes, rend extrêmement complexe toute application réelle et conduit à

- ne travailler qu'en simulation, sans la prétention d'étendre les résultats à des applications réelles, ou

## Modélisation d'un agent autonome

- simplifier considérablement l'environnement de façon à limiter les connaissances devant être représentées.

La réactivité des systèmes est encore amoindrie si l'on considère que des phases de replanification doivent rattraper les événements imprévus observés en phase d'exécution.

- La stratégie de Newell consistant à créer des spécialités de recherche dont les fruits, une fois intégrés, conduiraient à un système autonome n'a pas abouti.

Les systèmes complets sont rares et demandent un investissement considérable en moyens matériels et humains.

Sur le plan représentationnel:

- Le fait de représenter le monde (le QUOI) et de faire intervenir le concepteur (le QUI) dans certaines fonctions de l'architecture (perception et/ou action) introduit l'hypothèse d'une réalité objective (partagée par l'agent et son concepteur à travers une même interprétation). Cette intervention du concepteur dans le traitement fonctionnel de l'architecture va à l'encontre de la caractéristique recherchée d'autonomie.

# L'autonomie par l'action

## 3.1 Introduction

En réaction à l'approche cognitive, un nouveau courant est apparu au cours des années 80. Son apparition est fortement liée à la volonté d'aller au delà des propriétés de raisonnement offertes par l'approche symbolique en reconsidérant, d'un point de vue pragmatique, les problèmes liés à la réalisation de systèmes physiques pouvant évoluer dans des environnements complexes et réels (non simulés). Une grande partie de ces travaux partagent notre domaine d'application: la robotique mobile.

En une dizaine d'années, ce courant comportementaliste a connu un essor considérable. Récemment, depuis le début des années 90, il s'est approché d'autres disciplines des sciences cognitives et a engendré le domaine de la "vie artificielle"<sup>1</sup>. Il est courant de trouver dans les conférences de ce nouveau domaine des auteurs s'étant illustrés dans l'approche comportementale.

Tout comme les courants se sont succédés dans le temps, la notion d'intelligence a évolué durant les trois dernières décennies: elle a successivement pris la connotation de raisonnement (approche cognitive), action (approche comportementale) et autonomie (vie artificielle).

Divers termes sont utilisés pour se référer au courant comportementaliste: généralement on parle d'*approche comportementale* ou d'activité située. Certains auteurs parlent même de "Nouvelle IA", ce qui est caractéristique de l'élan donné à ce courant par ses précurseurs et de l'accueil dont il a bénéficié. Du point de vue de la conception, on parle généralement d'*architecture réactive* (par opposition à l'approche délibérative de l'IA cognitive) ou *bottom-up*.

Ce chapitre est composé de trois parties:

Nous commençons par préciser les fondements du paradigme comportementaliste ainsi que la problématique qu'il introduit.

Nous regroupons ensuite l'essentiel des travaux de ce domaine en cinq architectures de contrôle proposées comme solutions au contrôle d'agents autonomes par l'approche comportementale. Nous illustrons chacune d'elles par la présentation de deux travaux significatifs. Pour chaque travail, nous nous efforçons de préciser la position et les intérêts des auteurs, nous décrivons l'approche proposée et nous en résumons les propriétés et les limitations. Sans prétendre être exhaustif, cet éventail de travaux permet de couvrir les différents sujets de l'approche comportementale et de préciser, dans une large mesure, les réponses déjà proposées dans la littérature.

En conclusion, nous mettons en évidence les apports et les limitations de l'approche comportementale aussi bien par rapport à l'approche cognitive que par rapport à notre approche de l'autonomie.

---

<sup>1</sup>Ce nouveau domaine (AL pour *Artificial Life*) est décrit par Bourgin comme étant le "projet de comprendre la viabilité des systèmes autonomes et, plus généralement, les propriétés émergentes du vivant". Langton [Langton89] parle de l'étude "de la vie telle quelle pourrait être et non pas telle qu'elle est". (extrait de [Bourgin92]).



Figure 3.1 : Architecture horizontale.

## 3.2 Les fondements du comportementalisme

L'approche comportementaliste liée à la problématique d'autonomie en IA est apparue dans le prolongement de plusieurs décennies de travaux dans des domaines aussi variés que l'informatique (matérielle et logicielle), la cybernétique (boucles de rétroaction), la robotique (mobile, en particulier), l'éthologie (modèles du comportement animal), la psychologie (cognitive) ou les neurosciences (structure du système nerveux).

Ce courant focalise son attention sur l'*action*. Elle devient le pivot de l'autonomie, réduisant le raisonnement au minimum, le reléguant même au second plan.

La caractéristique principale de cette approche est de considérer une activité de nature *située*, où l'action s'inscrit dans un contexte physique (spatial et temporel) très concret. Elle ne se résume plus à une séquence de mouvements figés et aveugles mais prend en compte la situation par une adaptation *réactive* au milieu, à travers une interaction continue.

De façon générale, le monde animal (celui des insectes, en particulier) sert de source d'inspiration à l'approche comportementale. De façon spéculative, on prête généralement peu de capacités de raisonnement à la fourmi ou à l'araignée; pourtant, dans une large mesure, elles ne laissent pas passer les occasions qui se présentent, elles évitent les obstacles, elle fuient le danger et, simplement, elles survivent aux aléas de la vie. Voilà le type d'autonomie convoité par l'approche comportementaliste.

De façon générale, l'activité des insectes est observée et qualifiée de réactive en IA. De cette observation, on en infère sa nature *située*. Remarquons que l'éthologie, par la même méthodologie d'observation, différencie de façon similaire les animaux dans ses descriptions de "répertoires comportementaux"; dans ce cas, les invertébrés (à squelette externe) sont considérés comme des individus réactifs alors que les vertébrés (à squelette interne) sont qualifiés de (plus) cognitifs [Carthy71].

Les travaux du courant comportementaliste se caractérisent par le fait que

1. le *comportement* est l'élément central; l'autonomie ne résulte plus d'une succession de traitements fonctionnels et monolithiques entre la perception et l'action, mais plutôt de la coordination de comportements de base.

Ce changement introduit une architecture différente de l'architecture fonctionnelle (verticale) présentée au chapitre 2: Brooks l'appelle l'*architecture horizontale*<sup>2</sup>.

2. chaque comportement de base est porté par une structure plus ou moins directe liant certains capteurs à certains effecteurs. Les connexions *capteurs*-("système nerveux central")-*effecteurs*, évolutives chez les organismes vivants, sont câblées ou programmées et généralement figées dans les agents artificiels.
3. les traitements réalisés entre le signal et la commande sont réduits au minimum; on a affaire à un *raisonnement limité* ou même inexistant.

<sup>2</sup>En fait, on retrouve généralement les mêmes étapes fonctionnelles dans chacun des comportements. L'originalité consiste à distribuer le traitement de l'information à travers les comportements et à l'adapter et le réduire aux besoins spécifiques de chaque comportement. Par ce biais, le problème du contrôle comportemental vient remplacer celui du traitement de l'information.

### 3. L'autonomie par l'action

4. les traitements se situent à un niveau *sub-symbolique* (ou sensori-moteur); du genre stimulus-réponse ou condition-action, par opposition au niveau symbolique de l'approche cognitiviste.
5. le problème central devient celui de la *coordination* de comportements; ayant un potentiel de comportements primitifs, il s'agit d'organiser leur influence sur l'activité globale du système.
6. la coordination tend à se faire suivant un *contrôle distribué*; elle n'est plus centralisée comme dans le cas de l'architecture cognitiviste.
7. la connaissance du système tend à apparaître suivant une *représentation distribuée*; elle est répartie et locale aux comportements qui l'exploitent.
8. de façon générale, d'une coordination adaptée des comportements de base coexistants peuvent *émerger* de nouveaux comportements plus complexes.

Précisons encore que les comportements considérés peuvent être décrits comme des tendances d'attraction ou de répulsion par rapport à des caractéristiques externes observées en un instant donné. Le vocabulaire éthologique propose différents termes (tropisme, taxie ou pathie) suivant la nature de cette tendance<sup>3</sup>. Nous engloberons le tout par le terme de tendance, en précisant l'orientation lorsque cela sera nécessaire (attraction, répulsion).

En ce qui concerne les propriétés attendues par l'observateur d'un tel système, les principes énoncés ci-dessus doivent conduire à des agents offrant:

- des temps de réponse adaptés à la dynamique du milieu,
- une flexibilité accrue par rapport aux imprévus qui surviennent de façon inévitable,
- une adaptation aux circonstances de l'environnement immédiat,
- une polyvalence dans les tâches réalisées.

Ces propriétés font qu'un système comportemental (physiquement réel, non simulé) doit pouvoir évoluer dans son milieu (réel, non simulé).

Enfin, si les principes de base se retrouvent dans la majorité des travaux de ce domaine et ont donné lieu à différents mécanismes de contrôle que nous allons passer en revue dans la suite, les propriétés attendues de la part de ces systèmes ne sont que partiellement satisfaites. Nous y reviendrons dans la conclusion.

### 3.3 La problématique

Le paradigme comportementaliste introduit une problématique précise qui est celle du contrôle d'une activité de nature située.

Avant d'énoncer cette problématique et pour mieux la décrire, une digression sur la notion de comportement s'impose.

---

<sup>3</sup>A l'origine uniquement appliquée aux végétaux par les botanistes, la notion de *tropisme* s'est généralisée au monde animal. Elle correspond à la réaction d'orientation d'un organisme à une influence physico-chimique extérieure. Elle a successivement été interprétée comme un réflexe (thèse mécaniste du comportement, réduisant l'animal à une machine cybernétique), puis comme une réaction adaptative (faisant intervenir un état interne au système pour expliquer certaines inversions du sens de la réaction). Le terme de *taxie* correspond de façon plus précise à cette deuxième acception (on parle de phototaxie, géotaxie, chimiotaxie, ... suivant la nature du phénomène physique externe constituant le stimulus auquel réagit l'organisme). Enfin, la notion de *pathie* correspond à l'orientation négative, à une réaction d'évitement de l'excitation. On oppose parfois taxie et pathie, pour couvrir totalement la notion de tropisme.

Imaginons que nous soyons à table et que, tout en dialoguant avec notre vis-à-vis, nous allongions notre bras pour saisir notre verre dans le but de nous désaltérer. Un ensemble d'éléments anatomiques et physiologiques sont entrés en jeu. Pourtant, à quel niveau situerions-nous le comportement? Est-ce la coordination de micro-comportements accrochés à chaque articulation, chaque muscle, chaque tendon ou chaque cellule qui explique le mouvement observé? Ou est-ce un seul comportement qui coordonne le mouvement de l'ensemble du corps? Ou encore une séquence temporelle de comportements unitaires? Ou la coordination du bras et de l'œil permettant d'ajuster le mouvement?

La notion de comportement est difficile à délimiter. Le comportement peut être composite et distribué (spatialement et temporairement) ou unitaire et englobant. Il peut aller du mouvement élémentaire à l'attitude générale. Tous les points de vue sont justifiables.

En robotique, où le comportement est associé à l'idée de mouvement, ce flou apparaît également et des choix doivent être faits. Les primitives de contrôle peuvent se situer à des niveaux d'abstraction différents (nombre-de-tics-de-roue, avancer-tourner, suivre-le-couloir, aller-à-la-bibliothèque, surveiller-les-locaux, survivre) et apparaître suivant des modalités différentes (mouvement en vitesse, en accélération, en distances relatives, en positions absolues).

Ainsi, quel que soit le niveau d'abstraction ou la granularité des comportements traités, toute application pratique conduit à une discrétisation des mouvements en des unités comportementales élémentaires et généralement indépendantes.

Une dépendance forte existe néanmoins. Les effecteurs permettant le mouvement constituent un goulet d'étranglement; en effet, deux comportements contrôlant les mêmes effecteurs sont condamnés soit à s'entendre pour pouvoir accéder séquentiellement à leurs effecteurs communs, soit à trouver un compromis leur permettant de s'exprimer partiellement mais simultanément.

Ainsi, la coordination de comportements situés débouche sur deux approches différentes du contrôle qui, elles mêmes, reflètent deux analyses de l'observation du comportement.

1. Le premier point de vue consiste à dire que les comportements sont indépendants et qu'à tout instant, un seul comportement s'exprime en action.

Cette position conduit à traiter le problème de la sélection continue d'un comportement parmi  $N$  comportements possibles indépendants. Dans la littérature, cette problématique est couverte par le terme de *sélection d'actions*.

2. Le second point de vue consiste à dire qu'à tout instant l'action observable d'un individu correspond à un compromis de tendances portées par un ensemble de comportements.

Cette position conduit à traiter le problème de l'intégration d'un ensemble de potentialités en une action les reflétant. Nous nommons cette problématique l'*intégration comportementale*.

Remarquons que l'intégration comportementale peut être vue comme une approche générale au problème du contrôle de l'activité. En effet, si elle intègre les comportements en pondérant leur influence, la sélection d'actions peut être vue comme un cas extrême et particulier d'intégration.

La suite du chapitre permettra d'illustrer les solutions proposées dans la littérature pour aborder, à travers ces deux approches, une problématique générale commune qui est celle du contrôle de l'activité.

### 3.4 Cinq architectures de contrôle

Les travaux de l'approche comportementale se caractérisent par la diversité des mécanismes de contrôle qu'ils proposent. Cette diversité reflète la variété de motivations liées à ces travaux.

Certains, dans un excès de pragmatisme, proposent des solutions *ad hoc* pour traiter des problèmes particuliers; ces travaux ne supportent pas la généralisation à d'autres tâches.

### 3. L'autonomie par l'action

D'autres, dans un excès de purisme, s'intéressent à mimer, le plus fidèlement possible, les structures observées dans les organismes vivants; ils trouvent par contre des difficultés à appliquer leurs mécanismes, tellement la complexité des structures mises en place dépasse les moyens d'analyse offerts par les sciences de l'ingénieur.

Il existe autant d'architectures de contrôle que de travaux publiés dans ce domaine. Pour notre part, nous décomposons l'approche comportementale en quatre types d'architectures génériques de contrôle qui répondent à la problématique introduite. Une cinquième architecture, utilisant hiérarchiquement les quatre premières, vient compléter notre état de l'art des architectures comportementalistes en IA.

Précisons que cette taxinomie est celle qui nous a paru associer au mieux les propriétés de globalité (elle couvre, sinon tout le domaine, une grande partie), spécificité (elle permet d'extraire les caractéristiques principales du paradigme comportementaliste) et discursivité (elle facilite la présentation d'un domaine aussi fourni qu'hétérogène). Elle reste néanmoins plus une proposition de classification qu'une norme établie.

Le problème de la *sélection d'actions* peut être abordé soit par un choix aléatoire du comportement, soit par un choix suivant une priorité particulière entre comportements, soit finalement par l'organisation d'une compétition entre comportements provoquant l'émergence et la sélection du comportement vainqueur.

La solution du choix aléatoire ne sera pas abordée ici; elle ne conduit à aucune régularité comportementale globale. S'il s'agit bien d'une technique possible de contrôle, elle représente l'antithèse de la coordination comportementale.

D'autre part, le problème de l'*intégration comportementale* ne peut être abordé que par des techniques permettant une fusion de l'ensemble des réponses du système en une réponse de consensus. Cette intégration nécessite un support commun à toutes les réponses; le problème de la représentation est donc central dans cette approche et contraint fortement les architectures envisageables.

Enfin, nous verrons que l'approche connexionniste permet d'aborder les deux problématiques (sélection et intégration). Face à la rigidité d'organisation des autres approches comportementales, le connexionnisme place la capacité d'adaptation au centre du débat. Dans ce cadre, nous mentionnerons la contribution originale d'un ensemble de travaux associant la théorie mathématique de la morphodynamique à l'interprétation du modèle d'autopoïèse.

Parmi ces possibilités, les architectures que nous retenons sont:

1. Le contrôle par *priorités*: une priorité prédéterminée est attribuée à chaque comportement et, parmi le sous-ensemble de comportements prêts à s'exprimer en action, seul le comportement ayant la plus haute priorité prend le contrôle.

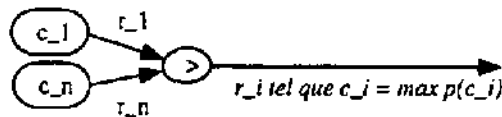


Figure 3.2 : Contrôle par priorités.

2. Le contrôle par *fusion*: à tout moment l'action réalisée par le système est un compromis tenant compte d'un ensemble de tendances (comportements ou objectifs).

Sous sa forme générale, cette architecture généralise l'architecture par priorités. Nous la limitons au cas où deux tendances au moins s'expriment dans chaque réponse donnée par le système. Elle répond ainsi spécifiquement au problème de l'intégration comportementale.

3. Le contrôle par *compétition*: la compétition entre éléments est portée par un réseau d'influences régulièrement fourni en activité (externe ou spontanée) et dans lequel les

### Modélisation d'un agent autonome

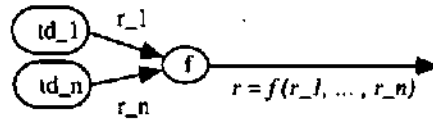


Figure 3.3 : Contrôle par fusion.

éléments s'activent ou se désactivent à travers différents types de connexions. Parmi les éléments candidats à l'action, seul l'élément le plus activé, résultat de la dynamique interne de propagation d'activations, s'exprime en action.

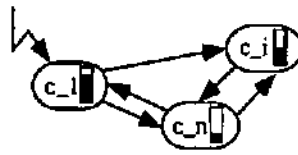


Figure 3.4 : Contrôle par compétition.

Si le contrôle par priorités est une approche centralisée au problème de la sélection d'actions, le mécanisme de contrôle par compétition se différencie essentiellement par sa nature distribuée. En plus de cette spécificité, l'approche par compétition peut apparaître comme un contrôle par priorités dynamiques. Elles apparaissent donc comme deux solutions conceptuellement différentes à la sélection d'actions.

4. Le contrôle *connexionniste*: comme son nom l'indique, ce type de contrôle se caractérise par l'utilisation exclusive de techniques connexionnistes. Il s'intéresse à l'acquisition des mécanismes de coordination en fonction de l'expérience. De plus, il permet de proposer une solution aussi bien à la sélection d'actions qu'à l'intégration comportementale.

Une approche récente et prometteuse, la morphodynamique, allie l'évolution de la dynamique et de la structure portant cette dynamique.

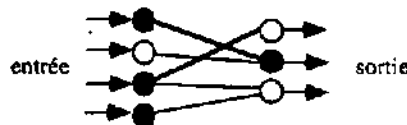


Figure 3.5 : Contrôle connexionniste.

5. Enfin, le contrôle *hiérarchique*: il permet de composer des comportements à des niveaux d'abstraction différents. Ces compositions se font généralement à travers les différents contrôles génériques. Il s'agit donc d'une architecture composite du point de vue du contrôle.

Il est étonnant de constater que, bien que l'essentiel des modèles du contrôle comportemental proposés en éthologie soient de nature hiérarchique [Tinbergen50, Baerends76], les travaux de l'IA comportementaliste ont boudé cette approche. Des travaux tels que [Halperin91] et [Rosenblatt-Payton89] sont venus combler ce vide par des structures connexionnistes hiérarchisées. Tyrrell, qui propose une amélioration du système de Rosenblatt et Payton, recouvre ces travaux [Tyrrel93].

### 3. L'autonomie par l'action

De même, Roitblat présente une version connexionniste et hiérarchique du mécanisme de compétition [Roitblat91].

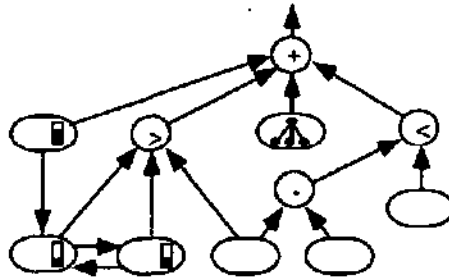


Figure 3.6 : Contrôle composite et hiérarchique.

Nous mentionnons cette architecture pour illustrer la possibilité d'incorporer différents types de contrôles génériques en un système unique. Ses propriétés quant au contrôle comportemental reposant essentiellement sur celles des mécanismes qui la composent, nous ne la développerons pas dans la suite.

Pour conclure cette énumération, précisons que malgré les liens pouvant exister entre les catégories extraites, ces architectures aspirent à illustrer leurs particularités plutôt que leurs points communs.

Dans la suite de ce chapitre, nous précéderons la caractérisation de chacune des architectures par la description et l'analyse de deux travaux représentatifs. La conclusion présentera une synthèse et situera la contribution du paradigme comportementaliste au domaine des agents autonomes.

## 3.5 Le contrôle par priorités

Le contrôle par priorités est une solution possible au problème de la sélection d'actions.

Il consiste à sélectionner un comportement parmi  $N$ , en ne s'intéressant qu'à leur possibilité de s'exprimer en action (les comportements n'ayant rien à proposer ne sont pas candidats à la sélection). Le choix est réalisé par un système central en tenant compte d'un état de priorités permettant de départager les comportements candidats.

La technique permet d'envisager des priorités données ou acquises, figées ou dynamiques. L'approche couverte ici ne comprend que des priorités données a priori et figées (les comportements sont pré-ordonnés une fois pour toutes). En complément, les techniques connexionnistes décrites au paragraphe 3.8 permettent d'illustrer des mécanismes de contrôle par priorités acquises et dynamiques.

Dans le cas de priorités données et figées, celles-ci peuvent correspondre à un ordre de traitement des comportements ou être induites par une structure de contrôle particulière. La *subsumption architecture* de Brooks et le système *Pengi* d'Agre et Chapman vont servir à illustrer ce mécanisme de contrôle.

### 3.5.1 La *subsumption architecture* de Brooks

Rodney Brooks propose, en 1986, la *subsumption architecture* [Brooks86b] comme outil de conception de systèmes artificiels comportementaux.

Son travail met l'accent sur une intelligence "incrémentale"<sup>4</sup> à partir de comportements

<sup>4</sup>Par ajouts successifs de nouvelles compétences.

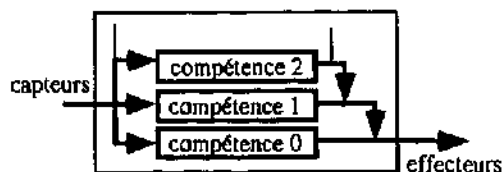


Figure 3.7 : La *subsumption architecture*.

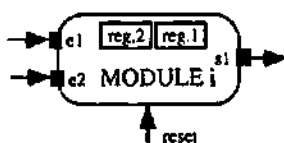


Figure 3.8 : Module de la *subsumption architecture*.

réactifs simples et un raisonnement distribué prenant l'environnement de l'agent comme modèle, en lieu et place d'une représentation interne.

D'autres auteurs, Braitenberg en particulier [Braitenberg89], ont préconisé l'approche comportementale en IA à peu près au même moment. Le mérite de Brooks est d'avoir su attirer l'attention sur cette approche en publiant alternativement des articles techniques décrivant des résultats concluants [Brooks87a, 88, Brooks-al.86, 88, Brooks-Connel86] et des essais justifiant et consolidant son approche [Brooks86a, 87b, 87c, 90, 91a, 91b, 91c].

## Description de l'architecture

L'architecture se base sur la décomposition comportementale en *niveaux de compétences*. Ces niveaux sont structurés, un niveau supérieur ayant une certaine influence de contrôle (ou priorité) sur les niveaux inférieurs à lui. La figure 3.7 représente cette architecture générale<sup>5</sup>.

Les niveaux de compétences sont généralement liés aux capteurs et aux effecteurs, formant ainsi des "boucles à travers le monde". Cette décomposition horizontale permet, entre autres, de distribuer le traitement de l'information sur des unités spécialisées. Par opposition à l'architecture fonctionnelle (voir paragraphe 2.3) où toutes les informations provenant des capteurs sont centralisées pour leur traitement, la subsumption connecte chaque niveau aux capteurs les plus adaptés à leurs compétences.

De façon interne, chaque niveau de compétence est composé d'un réseau de modules liés par des canaux de communication appelés fils.

Un *module* est muni de registres internes et de portes d'entrée et de sortie pour la réception et l'envoi de messages. Les entrées peuvent être connectées aux capteurs ou aux sorties d'autres modules. Les sorties peuvent être connectées aux effecteurs ou aux entrées d'autres modules.

D'un point de vue informatique, un module est un processus parallèle asynchrone. Chaque processus est décrit par un automate d'états finis (AF). Il possède à tout moment un état courant qui spécifie l'opération réalisée par le processus. Toute opération se termine par une transition dans un nouvel état de l'AF.

En chaque état de l'AF, cinq opérations sont possibles:

<sup>5</sup> Il semblerait naturel de considérer qu'il s'agit là d'une architecture hiérarchique, ne serait-ce que par la présence de *niveaux de compétences*. Pourtant, les comportements ne sont pas composés hiérarchiquement; c'est le contrôle qui est hiérarchique. Dans ce cas, nous préférons parler de priorité et non de hiérarchie.

### 3. L'autonomie par l'action

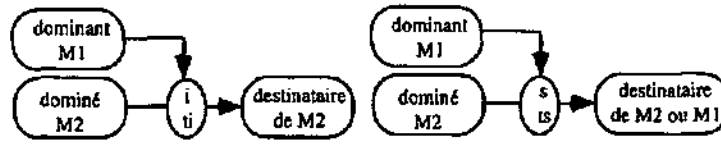


Figure 3.9 : Les circuits arbitres de la *subsumption architecture*: inhibiteur et supprimeur.

- le *traitement d'événement*, qui "écoute" aux entrées du module et décide de l'événement à traiter,
- le *traitement conditionnel*, qui évalue une expression et utilise le résultat de l'évaluation pour déterminer l'état suivant parmi un ensemble d'états possibles,
- la *sortie*, qui évalue une expression et envoie le résultat à une sortie,
- l'*affectation*, qui évalue une expression et affecte le résultat à un registre interne,
- enfin, l'*action*, qui envoie une commande aux effecteurs.

De plus, pour faciliter la synchronisation de l'ensemble du réseau lorsque cela est nécessaire, les modules possèdent une entrée *reset* dont l'événement permet de remettre l'AF à son état initial.

Enfin, le *fil* permet de relier une sortie à un ensemble d'entrées pour une communication unidirectionnelle.

Les niveaux de compétences sont donc formés de modules connectés sous formes de chaînes reliant les capteurs aux effecteurs. C'est à travers ce réseau de processus parallèles qu'est propagée de module en module l'information traitée par le système.

#### Le contrôle

Le contrôle est réalisé à l'aide de deux types de *circuit arbitres* (l'inhibiteur et le supprimeur) placés conceptuellement à l'intersection des fils. Chaque circuit possède deux entrées (dominant et dominé), une sortie et un temps d'arbitrage.

- L'*inhibiteur* permet au module dominant d'inhiber tout message provenant du module dominé pendant un temps constant  $t_i$ . Le message envoyé par le dominant sert uniquement de signal au circuit arbitre et n'est pas propagé.
- Le *supprimeur* permet d'inhiber tout message provenant du module dominé pendant un temps constant  $t_s$ . Le message envoyé par le dominant sert de signal au circuit arbitre et est propagé à la destination du fil.

Il peut y avoir plusieurs inhibiteurs et/ou supprimeurs se succédant sur un même fil avec des modules dominants différents.

#### Formalisme et implantations

Le formalisme de base utilisé est proche de celui des AF. Le langage de description de l'architecture a été implanté en LISP. De plus, un compilateur permet de générer le code assembleur correspondant à une description d'un système particulier. Ce code peut être chargé sur différents types de processeurs. Le souci d'efficacité est caractéristique des premiers travaux de Brooks et, plus généralement, de l'approche comportementale.

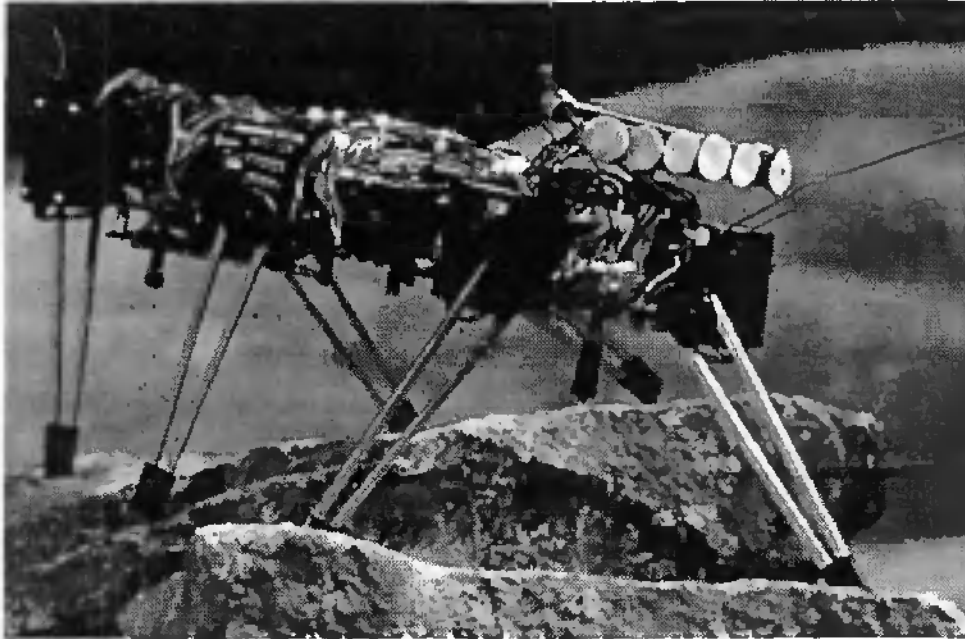


Figure 3.10 : La "Fourmi" Genghis.

Plus récemment, un langage comportemental a été introduit, permettant de regrouper des ensembles disjoints de modules en des entités plus abstraites constituant les comportements. Les mêmes mécanismes de propagation de messages, inhibition et suppression opérant entre modules peuvent apparaître entre comportements. Ceci permet de travailler à un niveau d'abstraction supérieur avec la même sémantique opératoire.

### Produits de la *subsumption architecture*

La *subsumption architecture* a permis d'expérimenter différents systèmes évoluant dans des environnements réels. [Brooks90] décrit neuf types de robots construits dans son laboratoire, au MIT.

Ces systèmes utilisent différents types de capteurs. Les plus simples tirent profit de quelques sonars et infrarouges. D'autres utilisent l'odométrie, une boussole, des caméras, des capteurs de force et des inclinomètres.

Les comportements qu'ils exhibent sont typiques en robotique mobile: l'arrêt d'urgence, l'évitement d'obstacles, l'errance, le suivi de caractéristiques observables (murs, corridors, objets) et la recherche de lumière ou d'ombre. La "fourmi" Genghis est certainement l'un des systèmes les plus connus. Il s'agit d'un robot muni de six pattes, pesant 1 kg. et pouvant se déplacer dans des environnements encombrés d'objets ayant une hauteur comparable à celle du robot. Genghis ne les évite pas, elle les enjambe!

### Propriétés et limitations

Différentes motivations sont à l'origine de chacune de ces générations de robots qui, de façon empirique, démontrent les propriétés énoncées dans ce qui suit.

- L'architecture reflète la volonté d'*intégration* de plusieurs niveaux de compétences comportementales permettant l'*émergence* d'un comportement global. On trouve cette ambition dès

### 3. L'autonomie par l'action

le premier robot (Allen).

Cette intégration va de pair avec la capacité de *construction incrémentale* des systèmes (évolution par l'ajout de nouveaux niveaux de compétences à des systèmes ayant déjà fait leurs preuves dans des compétences "inférieures").

À ce propos, une question revient souvent lorsque l'on parle de la *subsumption architecture*: quelles sont les limites d'évolution d'un tel système, combien de niveau de compétences peut-on y intégrer? Les schémas de systèmes proposés et réalisés par l'équipe de Brooks contiennent de trois à cinq niveaux de compétence décomposés en une vingtaine de modules.

En fait, cette question est liée à la difficulté de maîtriser le contrôle du système à l'aide de circuits arbitres tels que les inhibiteurs et les supprimeurs. Le travail de conception devient rapidement trop complexe pour être maîtrisé. Il suffit d'imaginer la tâche ardue du calibrage du temps d'arbitrage de chacun des circuits! Seul l'emploi de techniques adaptées d'apprentissage permettrait d'aborder une telle tâche (sans même assurer d'y parvenir). Ce fait est d'autant plus vrai que l'architecture gagnerait à envisager des valeurs temporelles dynamiques; en effet, des pondérations différentes sont nécessaires pour chaque environnement de nature différente.

- La capacité de *compilation* des systèmes est également caractéristique des travaux de Brooks. Elle a pour but ultime de pouvoir construire des circuits VLSI équivalents. Ceci indique la volonté d'obtenir une *exécution efficace* (en temps réel) de ces programmes.

Cette motivation va de pair avec la volonté de *distribuer le contrôle* dans des systèmes multiprocesseurs. Le robot-fourmi Attila [Angle-Brooks90], version plus complexe que Genghis, en est un exemple remarquable; le contrôle de 24 moteurs et 150 capteurs est distribué sur six pattes et 10 processeurs.

- L'une des propriétés les plus défendues par Brooks est celle d'"*utiliser le monde comme son propre modèle*"<sup>6</sup>; l'idée est de se passer d'un modèle global du monde et de laisser les niveaux de compétences puiser l'information dont ils ont besoin directement dans le monde réel. En effet, l'environnement immédiat est censé contenir toutes les informations nécessaires à la bonne marche du système.

Brooks a souvent soutenu que ses systèmes n'utilisaient pas de représentations; il a d'ailleurs écrit un article intitulé "*Intelligence Without Representation*" [Brooks87b].

En fait, ce qu'il avance, ce n'est pas tant de pouvoir se passer de représentations mais plutôt que ses systèmes ne sont pas décomposés en unités fonctionnelles interfacées sur la base de représentations comme nous l'avons décrit pour l'approche cognitive. Ses représentations sont de plus bas niveau (proches des signaux reçus des capteurs) et surtout elles sont totalement distribuées à travers le réseau de modules.

Récemment, à travers les travaux de Maja Mataric que nous décrivons au chapitre 4, des compétences de modélisation de la topologie sensorielle de l'environnement ont été ajoutées. Cela laisse envisager de nouvelles générations de créatures munies de capacités qualitativement supérieures. Nous y reviendrons car notre travail apporte justement une contribution dans ce sens à l'approche comportementale.

- Une autre propriété est celle de *communiquer à travers le monde*; aucun comportement ne contrôle l'effet de ses propres actes de façon interne, par des modules spécialisés. Ils le font "à travers le monde" par une rétroaction continue, par réaction à la modification de leur données capteurs. Ainsi, que cette modification soit l'effet des commandes de ce comportement ou non, cela importe peu. De la même façon, aucun comportement n'informe les autres de ses actes ou de ses intentions. Ils s'en rendent compte rapidement à travers leur attention à l'état de l'environnement, par une observation continue. Là aussi, l'identité du comportement ayant causé la modification importe peu.

---

<sup>6</sup>On trouve une forte analogie entre cette approche et la position écologique de Gibson en théorie de la vision.

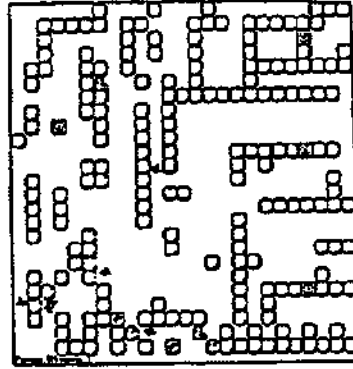


Figure 3.11 : Le jeu-vidéo *Pengo*. (repris de [Agre-Chapman87])

Plus généralement et par rapport aux dix premières années du mouvement comportementaliste, Brooks, qui en est l'un des promoteurs, a le mérite d'avoir explicitement abordé le problème des architectures de contrôle et d'avoir proposé un modèle concret. Son deuxième mérite est d'avoir fait fonctionner son modèle sur des systèmes réels et variés; cette caractéristique est assez rare<sup>7</sup> parmi les équipes travaillant dans ce domaine pour être mentionnée.

### 3.5.2 Le système *Pengi* d'Agre et Chapman

Dès le milieu des années 80 et suite aux limitations déduites d'une analyse systématique de la génération de plans d'actions cognitiviste, Agre et Chapman se sont penchés sur la nature de l'activité ("*everyday life activity*") et ont proposé le jeu *Pengo* [Agre-Chapman87] comme support expérimental d'une théorie plus large sur l'activité [Agre-Chapman90].

#### Description du système

*Pengo* est un jeu vidéo du genre "proie-prédateurs" constitué d'une grille contenant des cubes de glace et deux types d'agents: des abeilles (prédateurs) et un pingouin (proie). La disposition des cubes forme un labyrinthe dans lequel se meuvent les agents. *Pengi* est le programme visant à substituer le joueur qui, normalement, contrôle les mouvements du pingouin. Les abeilles ont tendance à chasser le pingouin et le tuent si elles s'en approchent suffisamment. Le labyrinthe peut être modifié par les agents en faisant glisser les cubes de glace par simple poussée. Tout agent percuté par un cube en mouvement est tué sur le coup et disparaît de la grille. Le but est de permettre au pingouin de survivre à ce monde hostile, en exploitant au mieux les situations qui se présentent à lui.

Cette application est à mi-chemin entre les simulations sous forme de jeux du paradigme cognitiviste et les applications réelles préconisées par Brooks. Malgré la simplicité de ses composants, *Pengo* introduit par sa dynamique deux propriétés n'apparaissant pas dans les jeux classiques mais apparaissant par contre dans notre vie quotidienne: l'*incertitude* liée au mouvement des cubes et des abeilles et l'*exécution en temps réel*.

Ces propriétés du jeu contraignent considérablement l'architecture de contrôle du pingouin et la représentation utilisée. Agre et Chapman adoptent une *position purement située*

<sup>7</sup> Voir [Dean-Bonasso93] pour quelques exemples de compétitions ou démonstrations d'applications en robotique mobile.

### 3. L'autonomie par l'action

de l'activité; elle est ancrée dans la situation courante observée par le système. Ils rejettent également toute représentation des effets des actions et donc tout raisonnement d'anticipation. De plus, ils ne considèrent aucun état interne à l'agent et aucune mémoire des expériences faites.

#### Le contrôle

L'activité apparaît dans *Pengi* sous la forme de règles SI-ALORS telles que "si on te chasse, fuis" ou "si tu rencontres un cube, percutes-le".

L'approche située implique une représentation relative à l'agent et à son activité; on parle de "l'abeille pourchassant par l'arrière" au lieu de "l'abeille I3 placée sur la cellule (23,65) en coordonnées absolues". C'est ce qu'on appelle des *représentations indexicales*. Nous retrouvons l'idée de "monde comme meilleur modèle de lui-même". Ce choix est lié au traitement localisé de l'information. Il tend à éviter toute explosion combinatoire du traitement et favorise ainsi l'action par rapport au raisonnement.

Dans le cadre du problème de la sélection d'actions, c'est un *système central* (réseau combinatoire) qui se charge de la sélection des règles à appliquer, par un mécanisme de *priorités* qui induisent un ordre total sur les règles en fonction uniquement de la situation courante et locale à l'agent.

La réalisation de l'une des actions modifie la situation (environnement local observé par l'agent) ce qui a pour effet de proposer un nouvel ensemble d'actions au mécanisme de contrôle. On peut dire que le système s'auto-alimente en activité par son activité même, grâce à la boucle d'interactions qu'il établit avec le monde. Nous retrouvons la propriété de "communication à travers le monde" qui est particulièrement bien adaptée à des applications générales en environnement fortement hostiles. Cette approche évite tout traitement du futur et toute considération de l'imprévisible en rendant l'activité opportuniste à l'extrême.

#### Propriétés et limitations

Comme nous l'avons vu, aucun traitement du futur, aucune expression des effets des actions ne sont considérés. Pourtant, un but existe, celui de survivre au caractère hostile de l'environnement. Il n'apparaît pas explicitement, mais il est contenu dans l'ensemble des règles d'activité mises à disposition du pingouin qui sont les maillons situés du comportement global devant émerger dans le temps et satisfaire le but.

Cette approche soulève clairement deux problèmes méthodologiques qui sont,

1. le choix des règles ou, plus généralement, le choix des capacités comportementales susceptibles de permettre à l'agent de réaliser certaines tâches,
2. le calibrage du contrôle.

Le "secret" de l'émergence de comportements globaux adéquats repose premièrement sur un bon choix des règles liant la perception à l'action. C'est un problème en soi que de choisir les règles (réflexes) intervenant dans le système, faisant appel à l'intuition du concepteur et nécessitant une approche empirique, accompagnée de longues séances de tests.

Il est à noter que *Pengi* n'a pas de mémoire et qu'il n'utilise aucun apprentissage lui permettant d'améliorer ses compétences émergentes par un traitement évolutif de l'activité située, tirant profit de l'expérience.

Une alternative serait précisément d'introduire l'apprentissage pour les liaisons perception-action. Ceci est certainement envisageable pour un apprentissage supervisé mais l'approche va à l'encontre de l'idée d'autonomie. Par contre, l'apprentissage non-supervisé n'est envisageable qu'en environnement simulé ou pour des espaces de perception et d'action très limités. Dans le cas contraire, le processus d'apprentissage est complexe et trop lent, dû au nombre de liaisons possibles et aux pondérations de celles-ci.

L'émergence des capacités globales dépend également d'un contrôle judicieux de l'activité située; deux agents disposant des mêmes règles d'activité située et de systèmes de contrôle différents auront des comportements émergents différents. A la limite, l'un survivra et l'autre non, alors que potentiellement, le vaincu pouvait survivre.

Enfin, dans le système *Pengi*, Agre et Chapman ont considéré des critères fixes de priorité et ont construit manuellement les réseaux combinatoires correspondants. Ceci n'est possible que pour un petit nombre de règles. Une fois les règles données, l'application d'algorithmes d'apprentissage (les AC, en particulier<sup>8</sup>) au choix des règles permettrait d'adapter les critères de priorité à travers plusieurs générations de pingouins (phylogénétiquement, par un genre de processus lamarckien<sup>9</sup>) et éviterait la tâche fastidieuse et inappropriée de construction du réseau combinatoire.

### 3.5.3 Commentaires

Les deux systèmes que nous avons décrits permettent d'illustrer la variété de solutions proposées à un mécanisme conceptuellement similaire: la sélection d'actions par priorités. Les niveaux de compétences du premier, structurés en une "hiérarchie" de contrôle, correspondent aux règles du second, contrôlées par un réseau combinatoire.

Remarquons qu'au niveau des applications, ces systèmes se caractérisent par des tâches très générales telles que "avancer en essayant d'enjamber (ou d'éviter) les obstacles rencontrés", "se diriger vers les zones de plus grande luminosité", dans le cas des agents physiques de Brooks ou "survivre en échappant aux prédateurs", dans le cas de la simulation d'Agre et Chapman. La généralité de la tâche contraste avec son unicité; en effet, ces systèmes doivent leur polyvalence à la généralité de leur tâche et non à sa variété.

Mis à part un choix aléatoire des comportements capables de s'exprimer en action, le contrôle par priorités est certainement le plus simple que l'on puisse imaginer dans le cadre du problème de la sélection d'actions. Il souffre néanmoins de sa rigidité car, dans des situations variées, des priorités différentes devraient être appliquées. Or, dans ces systèmes, ce n'est pas le cas; soit les situations rencontrées par l'agent sont assez similaires pour assurer l'adéquation du calibrage, soit la tâche réalisée est assez générale et simple pour pouvoir s'appuyer sur une structure de contrôle figée.

Finalement, malgré la simplicité de ce mécanisme, les agents dont nous avons parlé exhibent des comportements émergents qui sont loin d'être triviaux. A la limite et malgré l'apparence chaotique ou répétitive du comportement global de l'agent, celui-ci peut donner l'illusion, à un observateur non-averti, de suivre un plan préétabli.

## 3.6 Le contrôle par fusion

Le contrôle par fusion est une solution possible au problème de l'intégration comportementale.

Il consiste à calculer une réponse constituant un compromis à partir des réponses de  $N$  comportements voulant s'exprimer en action (les comportements n'ayant rien à proposer ne sont pas candidats à l'intégration). Le calcul est généralement réalisé par un système central prenant en considération toutes les réponses des comportements candidats.

La technique permet d'envisager des influences variées (pondérées) des comportements sur la réponse finale du système.

Une caractéristique importante de cette approche est de nécessiter des représentations permettant une interprétation uniforme des réponses. En robotique mobile, le choix de la

<sup>8</sup> Voir [Bourgine-Douzal91, Ahuactzin-al.92, Booker91].

<sup>9</sup> Le *lamarckisme* (de Jean-Baptiste De Monet, chevalier De Lamarck, naturaliste français, 1744-1829) est la théorie de l'évolution qui considère, d'un point de vue ontogénétique, l'influence du milieu sur le comportement et sur la morphologie de l'organisme et suppose, d'un point de vue phylogénétique, l'hérédité des caractères acquis.

### 3. L'autonomie par l'action

représentation se porte généralement sur une vectorisation du mouvement de l'agent, permettant sa projection sur une carte métrique.

Peu de travaux ont exploré cette approche. Nous allons l'illustrer par deux travaux dont la fusion porte sur des objets différents: celui d'Anderson et Donath [Anderson-Donath90] s'intéresse à la fusion de *comportements* alors que celui de Payton [Payton90] fusionne des *buts*.

#### 3.6.1 Fusion comportementale: Anderson et Donath

Plusieurs raisons nous ont poussé à choisir ce travail pour traiter l'approche de fusion comportementale:

- il aborde différentes questions que nous traitons également dans notre travail, en particulier: qu'est-ce que l'autonomie, peut-elle découler d'unités d'activité ayant la forme du réflexe, une activité réactive est-elle nécessaire, quels mécanismes de contrôle comportemental sont adaptés, enfin, quel est le rôle de la mémoire au niveau de chaque comportement indépendant et au niveau du système global?
- ses fondements sont tirés d'études du monde animal, ce qui permet d'illustrer les choix réalisés et les limitations de l'approche; dans ce sens, leur article est riche en informations pluri-disciplinaires et s'ouvre au courant des sciences cognitives,
- l'application de ce travail est également celui de la robotique mobile et y est décrite de façon extensive. Cet aspect est assez rare pour être valorisé, particulièrement dans une problématique de comparaison des approches,
- nous avons pu reproduire leurs expériences dans le cadre de notre environnement de travail, ce qui nous a permis, par l'expérience, d'apprécier concrètement la portée de leur approche.

#### Fondements

D'une étude du comportement animal, les auteurs extraient huit règles qui, à leurs yeux, sont essentielles à l'autonomie animale:

1. Tous les animaux possèdent, à un certain niveau, un ensemble de comportements innés leur permettant de répondre à différentes situations.
2. A tout moment, le type de comportement exhibé est le résultat d'un mécanisme interne de choix comportemental.
3. Un comportement complexe peut résulter de l'application séquentielle d'ensembles de comportements primitifs se déclenchant les uns les autres.
4. Des comportements réflexes, simples, indépendants de facteurs externes fournissent une protection à l'animal.
5. L'activation de comportements plus complexes est liée à des facteurs internes aussi bien qu'externes.
6. Les animaux ont développé des capteurs spécialisés leur permettant de discriminer les informations utiles dans l'espace sensoriel, évitant ainsi le traitement des informations inutiles.
7. Les comportements sont souvent organisés hiérarchiquement, les plus complexes résultant de l'intégration d'unités comportementales simples.

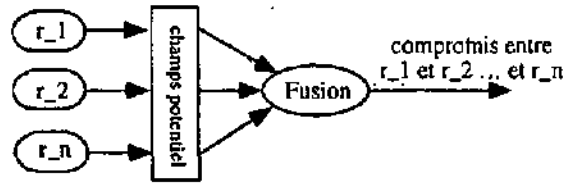


Figure 3.12 : Architecture de fusion chez Anderson et Donath.

#### 8. Des conflits comportementaux apparaissent chez les animaux.

Ces observations rappellent certaines propriétés trouvées dans les systèmes décrits précédemment. Ils sont la toile de fond de l'architecture d'Anderson et Donath.

### Le comportement primitif et l'émergence comportementale

Du point de vue de l'observateur, Anderson et Donath modélisent le comportement comme une réponse réflexe (innée et rigide) à un stimulus particulier. D'un point de vue interne, il s'agit d'un ensemble de processus par lesquels le système perçoit à la fois le monde externe et son état interne, et répond aux changements qu'il perçoit. Les comportements n'ont pas de mémoire, ce sont des réactions instantanées aux situations observées appartenant à l'une des deux catégories suivantes: attraction ou répulsion<sup>10</sup>.

Ces comportements sont indépendants, ce qui implique qu'ils ne se contrôlent pas entre eux. Le système de contrôle est découplé des comportements.

L'une des originalités de l'approche est l'étude de mécanismes permettant l'intégration (point 7) par fusion, et non par séquençement (point 3), de comportements indépendants en un comportement plus complexe.

Pour cela, les auteurs utilisent des *champs potentiels* (représentation uniforme inspirée de la physique) leur permettant de projeter l'ensemble des données comportementales sur un plan unique. Ces champs potentiels ont la propriété de permettre une intégration de l'ensemble des tendances comportementales en une réponse unique qui est la somme pondérée de l'ensemble des réponses.

Dans le cas de la robotique mobile, le champ potentiel est appliqué généralement sur une carte polaire centrée sur le robot, permettant de représenter toutes les réponses des comportements sous la forme de vecteurs de mouvement. La réponse du système, après fusion, sera un nouveau vecteur, somme pondérée des réponses obtenues des comportements mis en jeu.

Les onze comportements primitifs traités dans le travail d'Anderson et Donath sont donnés dans la figure 3.13. Cette base comportementale leur a permis de construire et d'observer six comportements émergents correspondant à six combinaisons particulières des comportements de base.

### Propriétés et limitations

Le mécanisme de fusion est simple. La difficulté réside dans la recherche d'une représentation permettant une expression uniforme des réponses de l'ensemble des comportements. Leur choix s'est porté sur les champs potentiels. Ce choix paraît naturel lorsqu'il s'agit de déplacements. Il est donc particulièrement adapté à des tâches de navigation en robotique mobile.

<sup>10</sup>Calquée des deux orientations observées dans les tropismes (taxies et pathies) des organismes vivants, cette classification dichotomique des comportements de bas niveau est souvent faite dans les travaux comportementalistes. Dans le domaine multi-agents en IA, Jacques Ferber [Ferber90] propose également des agents situés permettant, par des réactions locales et primitives de ce genre, de résoudre des problèmes globaux tels que le *N-puzzle* [Drogoul-Dubreil91].

### 3. L'autonomie par l'action

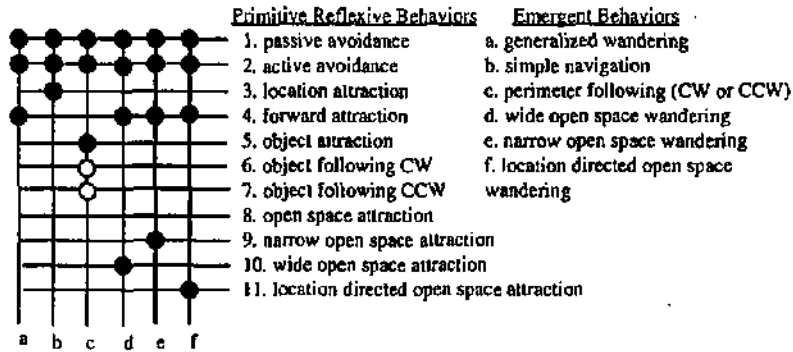


Figure 3.13 : Onze comportements primitifs et six comportements émergents par fusion de différentes combinaisons.

D'autres auteurs ont utilisé des représentations sous forme de champs potentiels liées à des comportements d'attraction et de répulsion ou simplement à des représentations de l'environnement<sup>11</sup>.

- Il est intéressant de constater que l'intégration d'un ensemble de comportements dans cette architecture fournit un nouveau *comportement émergent*, normalement plus complexe, de même nature: les entrées et sortie du comportement émergent s'expriment dans les mêmes espaces que celles des comportements primitifs.

Ceci permet d'envisager l'application de ce même mécanisme de fusion à des niveaux comportementaux de complexités différentes.

Pourtant, si les exemples donnés permettent de comprendre le comportement émergent comme fusion des comportements primitifs considérés, ceci serait-il encore vrai pour des fusions de comportements plus complexes? Cela est peu probable. Le comportement émergent aurait-il, à nos yeux, encore une cohérence ou même une régularité observable? Nous retrouvons le problème des critères à envisager dans le choix des comportements à intégrer.

- Une autre caractéristique de l'approche de fusion est de considérer, de façon naturelle, l'intensité de la réponse donnée par chacun des comportements et ceci indépendamment des facteurs utilisés dans la somme pondérée. En effet, la plupart des approches comportementales considèrent uniquement la présence ou non de réponse comme premier critère de sélection. L'intensité est rarement prise en compte pour le choix final.

- Cette approche requiert un traitement de bas en haut; étant donné un ensemble de comportements primitifs, il s'agit d'expérimenter différentes pondérations de combinaisons particulières. Il est, en effet, délicat d'aborder le problème par le haut en croyant pouvoir décomposer un comportement en comportements primitifs et trouver la pondération adéquate pour favoriser l'émergence désirée. Les deux opérations (décomposition et pondération) sont, une fois de plus, difficiles à maîtriser.

- Techniquement, une combinaison de comportements correspond à une tendance fixe. Or, si l'implantation de chaque comportement primitif permet et demande un calibrage fin de

<sup>11</sup>[Gatt-Müller91] constitue un bon exemple où les obstacles observés sont reportés sur une grille d'occupation [Elfes-Talukdar83] et les relations de proximité entre cellules sont exploitées pour extraire le squelette de l'espace libre par une technique globalement similaire. Ce squelette sert ensuite de caractéristique sur laquelle asservir le comportement en attraction pour des tâches de navigation.

la liaison perception-action afin d'exhiber des comportements robustes à une variété importante de situations, cette robustesse est difficile à maintenir pour le comportement émergent, résultat de l'intégration des comportements calibrés. L'approche ne permet à ce moment que la modification des facteurs de pondération de l'opération de fusion.

- Les tests réalisés par Anderson et Donath ont permis d'extraire deux problèmes liés à l'architecture de fusion: le blocage dans des *minima locaux* et les *comportements cycliques*.

- Deux comportements intégrés peuvent, à un moment donné et en certaines situations bien précises, fournir des réponses s'annulant parfaitement, alors qu'on ne s'attend pas à ce que leur fusion fournisse une réponse nulle. Ce problème est directement lié à la méthode de sommation vectorielle. Plusieurs solutions sont proposées telles que l'ajout de bruit sous la forme d'un vecteur supplémentaire, l'amélioration des fonction de pondération ou encore l'ajout d'un système superviseur détectant ces situations et fournissant une réponse. La première solution est la plus simple à mettre en pratique et la plus justifiable conceptuellement.

- Les comportements intégrés entrent parfois dans des cycles d'exécution. Ceci est dû essentiellement au caractère situé de la réponse; ces comportements ne font que réagir à l'environnement, ils perçoivent et répondent instantanément, ce qui les laisse à la merci des caprices de leur environnement. Heureusement, les applications en conditions réelles introduisent généralement suffisamment de bruit pour permettre à ces agents de s'extraire de ces bassins d'attraction.

- Enfin, Anderson et Donath ont voulu expérimenter les effets de l'absence de mémoire dans leurs comportements. Ils considèrent ne pas avoir besoin de mémoire pour ce type d'applications. Pourtant, des comportements sans mémoire sont extrêmement sensibles aux perturbations rencontrées dans des applications en conditions réelles. La mémoire est un facteur essentiel à la stabilité du comportement. Elle permet un traitement portant sur des successions d'observations, ce qui rend la réponse plus adaptée à la dynamique de l'environnement.

### 3.6.2 Fusion de buts: les plans internés de Payton

David Payton s'est fait remarquer pour ses travaux en planification hiérarchique au début des années 80. Par la suite, il a également abordé le problème de l'intégration du raisonnement dans le cadre d'un système autonome. Il considère que le problème de la planification hiérarchique, et de la génération de plans d'actions classique en général, est celui d'introduire, à travers des abstractions, des "barrières à l'interprétation"; la synthèse de données symboliques modifie (appauvrit) le contenu informationnel et provoque des pertes de connaissances.

#### Fondements

Payton propose de considérer la notion de plan non plus comme une programmation de l'action (approche classique), mais comme une *ressource pour l'action*. Le plan doit être une compilation des connaissances du monde permettant d'améliorer les performances d'un système formé de processus continus de décision.

La notion de plan comme ressource est proche de celle du *plan comme communication* de Agre et Chapman [Agre-Chapman90]. Le plan est ici *linguistique*; il dit ce qu'on doit faire ("aller jusqu'au prochain croisement puis tourner à gauche") et non comment le faire. Néanmoins, Payton considère que ces plans linguistiques sont encore trop abstraits et, quoiqu'adaptés aux capacités d'interprétation de l'Homme, incompréhensibles par une machine.

Pour illustrer son approche, Payton utilise l'analogie de la "boussole fantôme" qui donne à tout instant une orientation générale du chemin à prendre ou du choix à faire. Il est prévu que

### 3. L'autonomie par l'action

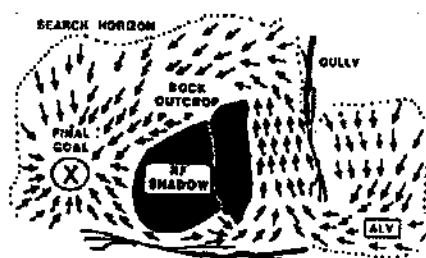


Figure 3.14 : Carte gradient 2D. (repris de [Payton90])

cette approche permette des réactions opportunistes aux changements observés du monde en fournissant toutes les possibilités d'orientation dans une représentation adéquate du monde<sup>12</sup>.

#### Représentation par gradient

Payton place la notion de plan d'actions au niveau de la représentation. Il recherche une représentation uniforme des connaissances permettant d'organiser l'information utile pour un problème donné, sans abstraction superflue, et de fournir cette représentation directement à l'interprétation du système. Le résultat de cette démarche est l'obtention de ce qu'il appelle un *plan interne*. Pour cela, il utilise des *représentation par gradient* (au sens de l'opérateur mathématique).

Dans son article [Payton90], il l'applique à la navigation d'un robot mobile à partir d'une carte 2D du monde. Dans une telle représentation, le gradient correspond à la direction de propagation d'une vague d'activation. Celle-ci décroît à partir d'un ensemble de buts localisés sur la carte en évitant les endroits non-navigables. Ainsi, en tout point navigable de la carte, il existe un vecteur donnant l'orientation à prendre pour atteindre l'un des buts, ce qui donne à la carte l'apparence d'une carte des courants maritimes convergeant sur les buts<sup>13</sup>.

#### Propriétés et limitations

Payton propose de considérer la donnée d'un gradient lié à un critère de décision, comme *une donnée sensorielle de plus*, au même titre que celles provenant des capteurs. Ainsi, le comportement du système est une réponse reposant sur l'interprétation de sources externes (données capteurs) et internes (carte de gradients).

Cette représentation du plan comme ressource permet de prendre en compte d'autres contraintes que la navigabilité: par exemple, la consommation d'énergie ou le temps pour atteindre le but. En effet, plus on est loin du but et plus on doit consommer de l'énergie et du temps pour l'atteindre. La technique du gradient permet de refléter ces informations.

De plus, les contraintes peuvent se propager de façon irrégulière, en fonction de la difficulté ou du risque liés à la navigation dans certaines zones. Les cartes représentant ces différentes contraintes sont donc autant de *critères de décision* pouvant influencer le comportement du système.

Ainsi, l'approche de fusion de buts permet de considérer plusieurs critères dans les processus de décision. A la limite, chaque critère est reporté sur une carte différente. De plus, les critères

<sup>12</sup>Dans ce sens, l'approche de Payton rejoint le travail de Schoppers (universal plans [Schoppers87]) qui exprime, dans un formalisme d'opérateurs proche de STRIPS, toutes les possibilités pouvant être considérées.

<sup>13</sup>Dans une optique similaire, Luc Steels propose également des représentation analogiques supportant des propagations parallèles sous la forme de gradients de caractéristiques du monde telles que la proximité ou l'intensité [Steels88, 90, 91].

sont considérés équitablement; a priori, une contrainte temporelle peut devenir aussi importante qu'un obstacle à contourner.

L'un des avantages majeurs d'une représentation sous forme de gradient est de proposer instantanément l'ensemble de tous les chemins optimaux menant aux buts. Le calcul du gradient est malheureusement un processus lourd, gourmand en temps de calcul. Généralement, la propagation de la "vague" se fait jusqu'à une certaine distance du but (horizon) qui permet de couvrir au moins la position courante du robot.

Une hypothèse forte de l'approche par gradient est de posséder des mécanismes d'auto-localisation fiables. En effet, une petite variation de la position du robot projetée sur la carte peut conduire à des propositions d'orientation totalement opposées. Malheureusement, l'hypothèse de localisation précise est illusoire pour des applications réelles où la dérive et l'imprévu sont des problèmes en soi. Payton propose néanmoins d'exploiter ce problème délicat en extrayant les régions critiques<sup>14</sup> à partir de la carte du gradient. Cette analyse lui permet de savoir

- où la carte gradient n'est pas utilisable vu le risque d'être mal localisé (là où une petite variation peut porter à conséquence),
- où le système doit être attentif dans sa perception et dans son action.

En rapport avec le deuxième point, la carte gradient peut servir à une confrontation des données calculées a priori avec celles calculées sur la base des observations courantes.

## Discussion

De tout ce qui précède, nous constatons que l'approche du gradient est une technique permettant de fusionner

- a. des critères multiples de décision,
- b. des buts multiples.

L'application du gradient à des cartes 2D de l'environnement pour des tâches de navigation est directe et naturelle. Elle exploite les propriétés de distance de la géométrie euclidienne pour déterminer l'état du système en position et orientation. Pour d'autres domaines, il est plus délicat de définir les états du système et de les percevoir.

Cette technique pourrait être utilisée sur des connaissances de proximité non-métriques; elles porteraient, par exemple, sur les transitions entre états provoquées par des opérations de base. Payton en exprime la possibilité sans toutefois envisager d'applications autres que géométriques.

### 3.6.3 Commentaires

Le contrôle par fusion constitue une excellente illustration de l'importance du choix de représentation dans les mécanismes d'intégration. Pour pouvoir coordonner des comportements, il faut pouvoir les mettre en rapport, les comparer.

Les deux techniques décrites - champs potentiels pour fusion comportementale (A) et cartes gradients pour fusion de buts et de critères (B) - possèdent des avantages essentiels par rapport aux techniques classiques de planification:

- Les calculs sont locaux (A) et, même lorsque les calculs sont globaux (B), les décisions sont locales (A et B).

---

<sup>14</sup>Une région critique est justement celle où une petite variation de la position estimée peut conduire à des réponses très différentes. Payton utilise des techniques mathématiques d'intégrales circulaires pour déterminer les zones critiques.

### 3. L'autonomie par l'action

- Le résultat fournit l'ensemble des plans possibles (B).

En fait, la propagation du gradient peut être vue comme la phase de planification *off-line* (comme dans l'approche cognitive), étant donné un ensemble de buts. La différence est qu'ici on planifie vers ces buts pour tous les états initiaux possibles. L'avantage est de ne pas avoir à replanifier lorsque la situation change de façon imprévue. La propagation du gradient n'est reconduite que lorsque les buts changent.

- L'action et la décision s'y succèdent sur de petits intervalles de temps. (A) réalise un calcul local entre chaque action alors que (B) utilise le résultat d'un calcul fait auparavant et une fois pour toutes.
- Des buts et des critères multiples (disjonctifs) peuvent être traités simultanément et de la même façon.

Il est également intéressant de comparer les deux types de représentations (A) et (B) entre elles.

Le calcul de (A) est simple, peu gourmand en temps de calcul et localisé. Il est réalisé en cours d'exécution. Celui de (B) est lourd mais se fait une fois pour toutes étant donné un ensemble de buts disjonctifs et un état de la carte (connaissance).

Alors que (B) donne une orientation pour tout point de l'espace d'états, (A) donne une orientation uniquement sur l'état courant. (B) se prêterait donc bien à des traitements de prévision alors que (A) ne permet qu'un traitement situé, sans anticipation.

Enfin, l'utilisation de (A) pousse parfois le système dans des minima locaux (lorsque les forces primaires s'annulent). Par contre, (B) les évite (en ne s'intéressant qu'à un seul but s'il le faut) par le fait que la fonction d'activation liée à chaque gradient décroît de façon monotone en s'éloignant du but.

Cette dernière propriété est importante pour des applications pratiques. Elle permet de valoriser considérablement les techniques de gradient.

## 3.7 Le contrôle par compétition

Le contrôle par compétition est une solution possible au problème de la sélection d'actions.

Il consiste à structurer les  $N$  comportements en un réseau d'influences et à établir les lois d'une dynamique qui permette d'instaurer une compétition portée par le réseau. Les éléments du réseau possèdent une valeur d'activation propre qui est continuellement remise en question par les influences propagées vers leurs voisins et reçues de ces derniers. Sur la base de certains critères, le comportement sortant vainqueur de cette compétition continue (celui ayant l'activation la plus élevée) s'exprime en action.

Dans les deux approches précédentes, contrôle par priorité et contrôle par fusion, les comportements sont des éléments indépendants les uns des autres. Ils n'interagissent pas entre eux. Le mécanisme de contrôle centralisé constitue leur seule liaison. Par contre, dans le contrôle par compétition, les comportements sont interconnectés suivant des connexions de différentes natures à travers lesquelles ils entrent en compétition par des influences positives ou négatives. Les comportements forment donc une structure particulière, animée d'une dynamique interne d'où émerge un contrôle par compétition.

La technique permet d'envisager une co-évolution entre la *structure* et la *dynamique de compétition* qu'elle porte. Ceci a néanmoins rarement été étudié<sup>15</sup>.

Nous allons illustrer cette approche par deux travaux d'inspirations très différentes. Chez Pattie Maes, ce sont des opérateurs (du type STRIPS) qui sont en compétition alors que chez Randall Beer on retrouve le même mécanisme de compétition à deux niveaux; plusieurs pseudo-neurones interagissent pour la réalisation de chaque comportement de base et les comportements eux-mêmes sont en compétition à travers un réseau similaire.

<sup>15</sup>La morphodynamique, que nous mentionnerons au paragraphe 3.8.3, traite ce problème en profondeur.

### 3.7.1 Compétition d'opérateurs STRIPS: Pattie Maes

Le travail de Pattie Maes se centre sur le problème de la sélection d'actions, dans une approche *bottom-up*, avec le but d'intégrer la capacité de planification dans un agent situé.

Son hypothèse de travail est que la sélection d'actions peut être une propriété émergente de la dynamique d'activation-inhibition entre les différentes actions de l'agent. Son but est de retrouver les fonctionnalités de l'approche délibérative à travers une approche distribuée (évitant tout contrôle centralisé), faisant émerger un contrôle rationnel à partir d'interactions locales entre les éléments du système (les opérateurs).

Enfin, la structure du système est fixe étant donné un ensemble particulier d'actions. Un simulateur lui a permis d'en étudier différentes dynamiques d'activation-inhibition.

#### Fondements

Cette approche s'attache aux caractéristiques que doit, d'après l'auteur, présenter un "bon" mécanisme de sélection, à savoir:

- favoriser les actions susceptibles de réaliser les buts,
- favoriser les actions adaptées à la situation courante,
- favoriser les actions qui s'inscrivent dans une démarche à long terme,
- être capable de prévoir à plus ou moins long terme,
- être robuste à des pannes de certains composants,
- enfin, être réactif et rapide.

Certains de ces points étant contradictoires (les deux premiers le sont fréquemment, par exemple), le mécanisme doit présenter une certaine flexibilité de façon à trouver un bon équilibre entre ces caractéristiques en fonction des particularités de l'environnement et de la tâche à réaliser.

#### Description du système

Un agent est muni d'un ensemble fixe d'actions nommées "modules de compétences" (que nous nommerons modules). Le formalisme utilisé pour décrire les modules est celui des opérateurs STRIPS. Ainsi, tout module  $m_i$  est formalisé par le quadruplet  $(c_i, a_i, d_i, a_i)$  où

- $c_i$ , est la précondition (ensemble de faits devant être vrais pour que  $m_i$  soit exécutable).
- $a_i$  est l'*add*-liste.
- $d_i$  est la *delete*-liste.
- $a_i$  est le niveau d'activation.

La description du monde, et de la situation courante en particulier, se fait, comme dans STRIPS, par des conjonctions de faits en exploitant l'hypothèse du monde clos.

Cette description ne s'intéresse qu'à l'interface causale entre le système et le monde et fige cette interaction une fois pour toutes. Elle se situe, comme dans l'approche cognitive, au-dessus de tout détail lié à la sémantique de l'action elle-même.

Avec ce seul formalisme, le système peut être construit. En effet, les modules sont reliés par trois types de liens en un réseau décrit par les formules  $c_i$ ,  $a_i$  et  $d_i$ . Il existe

- un *lien successeur* de  $m_x$  à  $m_y$  pour chaque proposition  $p \in a_x \cap c_y$ .
- un *lien prédécesseur* de  $m_x$  à  $m_y$  pour chaque proposition  $p \in c_x \cap a_y$ .
- un *lien conflictuel* de  $m_x$  à  $m_y$  pour chaque proposition  $p \in c_x \cap d_y$ .

### 3. L'autonomie par l'action

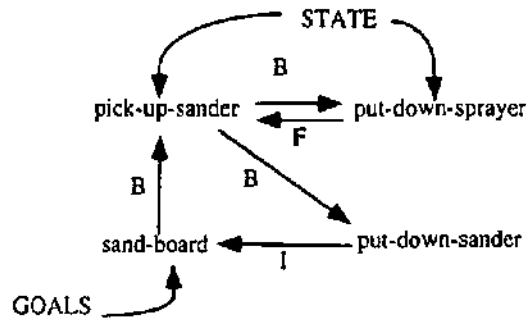


Figure 3.15 : Un réseau d'opérateurs. (tiré de [Maes90b])

Ces trois types de liaisons déterminent a priori la structure du réseau.

Finalement, sur la base de cette structure, Maes définit une dynamique de compétition à travers l'attribution d'une variable d'activation à chaque module, la spécification de sources d'activation externes sur les éléments du réseau et les règles de propagation interne de l'activation<sup>16</sup>.

Le réseau peut recevoir de l'activation externe provenant de trois sources: la situation courante, les buts courants ou les buts réalisés et protégés. Ainsi,

- un module  $m_i$  est activé en fonction du nombre de propositions de  $c_i$  apparaissant dans la situation courante. Il est plus ou moins adapté à la situation ou simplement réalisable (proximité à la situation).
- un module  $m_i$  est activé en fonction du nombre de proposition de  $a_i$  apparaissant dans le but courant. Il est susceptible de le satisfaire (proximité au but).
- un module  $m_i$  est désactivé en fonction du nombre de propositions de  $d_i$  apparaissant dans un sous-but réalisé et protégé. Il est susceptible de le détruire.

L'activation du réseau est continuellement mise à jour en fonction de la situation courante, du but de l'agent et des sous-but déjà réalisés qui sont automatiquement protégés.

Enfin, les liens entre modules permettent de propager cette activité externe à travers le réseau, de la façon suivante:

- *Activation des successeurs*: un module  $m_x$  exécutable propage une fraction de son activité  $a_x$  vers ses successeurs  $m_y$  dont la proposition  $p \in a_x \cap c_y$  est fausse. C'est une activation d'exécutabilité, ou activation "en avant", car l'exécution de  $m_x$  favoriserait celle de  $m_y$  par la satisfaction de  $p$ .
- *Activation des prédécesseurs*: un module  $m_x$  non-exécutable propage une fraction de son activité  $a_x$  vers ses prédécesseurs  $m_y$  dont la proposition  $p \in c_x \cap a_y$  est fausse. C'est une activation d'appuis, ou activation "en arrière", car elle favorise les modules qui peuvent rendre  $m_x$  exécutable.
- *Inhibition des conflictuels*: un module  $m_x$  (exécutable ou non) réduit d'une fraction de son activité  $a_x$  celle de ses conflictuels  $m_y$  dont la proposition  $p \in c_x \cap d_y$  est vraie. Cette inhibition tend à éviter qu'un module  $m_y$  détruise une précondition réalisée et rende  $m_x$  moins exécutable.

<sup>16</sup>Remarquons qu'une propagation d'activité sous cette forme correspond à construire un gradient à travers le graphe.

La figure 3.15 représente le réseau de connexions d'un problème traité<sup>17</sup>. Dans ce travail, l'algorithme général se résume donc à une boucle du genre:

1. calculer l'influence externe
2. calculer l'influence interne au réseau en propageant l'activation
3. normaliser les activations pour éviter de diverger
4. sélectionner un module

Les critères de sélection d'un module  $m_x$  sont

1.  $m_x$  est exécutable
2.  $a_x$  est supérieur à un seuil global préétabli  $\theta$ , il est donc sélectionnable.
3.  $a_x$  est supérieur ou égal à l'activation de tous les autres modules sélectionnables.

En cas d'égalité, un choix aléatoire est réalisé parmi les candidats. Si aucun module ne satisfait le critère, on recommence une boucle principale après réduction du seuil  $\theta$ .

## Calibrage

La dynamique du système se résume à un traitement instantané et distribué. Elle permet d'observer a posteriori des caractéristiques plus globales telles que la séquence des actions sélectionnées, son optimalité et le temps consommé pour sa génération.

Cinq paramètres permettent de varier la dynamique globale du système, à savoir:  $\theta$ , le seuil d'activation,  $\pi$ , la moyenne des activations,  $\phi$ , l'activité injectée par une proposition vraie dans le réseau (influence de la situation),  $\gamma$ , l'activité injectée par un but dans le réseau (influence du but),  $\delta$ , l'activité prise du réseau par un sous-but protégé.

Les fractions d'activité propagées dans la dynamique interne tiennent également compte de ces paramètres. La variation de ces paramètres permet donc d'équilibrer les propriétés émergentes du système telles que

- orientation but (*goal-orientedness*) / exécutabilité-opportunisme (*situatedness*),
- rigidité du plan (inertie) / flexibilité,
- raisonnement / rapidité,
- sensibilité aux conflits entre buts.

## Propriétés et limitations

L'approche de Maes retient notre attention essentiellement dans le sens où elle allie les aspects situés et orienté-but que nous considérons nécessaires à l'autonomie d'un système. On peut néanmoins mettre en exergue d'autres propriétés telles que

- faire de la "vraie" planification réactive, dans le sens où elle intègre l'action et le raisonnement grâce à une dynamique d'activation tenant compte continuellement de l'état du monde et des buts de l'agent,

---

<sup>17</sup> Les arcs courbés indiquent les activations externes au réseau, provenant de l'état courant et des buts. Les arcs *B* correspondent à des activations "arrière" vers les modules prédécesseurs, les *F* correspondent à des activations "avant" vers les successeurs et les *I* sont des inhibitions sur les conflictuels.

### 3. L'autonomie par l'action

- concilier l'orientation-but et l'orientation-situation: la dynamique d'activation se fait essentiellement dans deux sens; en avant (de la situation aux buts) et en arrière (des buts à la situation). Ces deux courants sont intégrés au niveau de chaque module par une simple somme de l'activation. Ceci permet de favoriser l'une ou l'autre des tendances en variant le rapport des paramètres  $\phi$  et  $\gamma$ ,
- le système est sensible aux modifications de l'état du monde ou des buts de l'agent en cours d'exécution, ce qui en fait un système réactif. Cette réactivité peut être plus ou moins marquée suivant la valeur des paramètres,
- un plan émerge de l'interaction entre actions structurées en un réseau figé.  
Finalement, les limitations que l'on peut imputer à l'algorithme proposé sont:
- l'apparition de boucles dans la séquence d'actions émergente pour certains problèmes donnés. Ceci est dû essentiellement au fait qu'aucune mémorisation de l'historique n'est considérée,
- le fait de figer la structure causale par la description des opérateurs à l'aide du formalisme STRIPS. L'auteur a récemment envisagé l'apprentissage de ces connaissances. Malheureusement, seule une pondération des connexions causales est envisagée, la structure causale elle-même restant similaire [Maes-Brooks91],
- la sensibilité aux calibrage: en effet, suivant les situations, une configuration précise de paramètres est plus ou moins souhaitable. Par exemple, l'algorithme résout correctement l'anomalie de Sussman<sup>18</sup> pour certaines valeurs des paramètres et tombe dans des boucles pour d'autres. Le calibrage est donc dépendant du problème et de l'agent (ensemble de modules, taille des préconditions, *add*-listes et *delete*-listes qui déterminent la structure du réseau).

#### 3.7.2 Compétition de pseudo-neurones: l'Aplysia de Beer

L'approche comportementale considère que les animaux manifestent la plupart des propriétés requises par un agent autonome. Elles s'inspirent de modèles souvent extraits de travaux éthologiques<sup>19</sup>. Certains travaux poussent l'analogie jusque dans la structure interne (neuronale) des mécanismes générant le comportement animal et s'inspirent de modèles neuroéthologiques<sup>20</sup>.

C'est le cas de l'approche adoptée par une équipe de l'Université de Case Western Reserve aux Etats-Unis où Randall Beer, Hillel Chiel et Leon Sterling simulent des insectes artificiels en reproduisant partiellement l'architecture du système nerveux de certains animaux naturels dits "simples". Leur travail va nous servir d'illustration pour l'approche dite neuro-mimétique [Beer90, Beer-al.90, Beer-Chiel91]<sup>21</sup>.

#### Fondements

Leur travail porte sur deux caractéristiques essentielles du comportement animal: l'adaptation et la plasticité.

La capacité d'adaptation correspond à un ajustement continu dans son interaction avec le monde en fonction à la fois de la situation observée (fuite, attraction) et de sa structure physique ou physiologique (amputations, lésions internes).

---

<sup>18</sup>Voir paragraphe 2.6

<sup>19</sup>L'éthologie s'occupe de l'étude du comportement animal dans son environnement naturel.

<sup>20</sup>La neuroéthologie s'occupe de l'étude des mécanismes neuronaux sous-jacents aux comportements.

<sup>21</sup>Relevons au passage la composante interdisciplinaire de l'équipe: on y trouve un informaticien, un biologiste et un mathématicien.

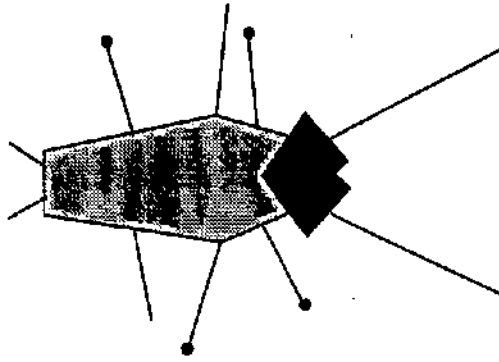


Figure 3.16 : Vue de l'animal simulé. (repris de [Beer-al.90])

La plasticité se rapporte à la capacité d'ajuster ses comportements aux conditions particulières du type d'environnement dans lequel il faut évoluer et survivre en fonction de l'histoire de son interaction. Différentes classes de plasticité sont mentionnées telles que l'habituation, la déshabituation, la sensibilisation ou l'apprentissage associatif. Nous en développerons certaines au chapitre 9, dans le cadre de notre travail.

## Niveaux de comportements

Beer et ses collaborateurs distinguent quatre catégories de comportements:

- les *réflexes*: réponses rapides et stéréotypées à un stimulus venant de l'environnement et dont l'intensité et la durée sont fortement couplées à celles du stimulus,
- les *taxies*: réponses orientées à un stimulus tel que la luminosité, la gravitation ou des signaux chimiques,
- les *schémas d'action fixes*: comportements plus complexes, souvent plus longs que le réflexe et dont l'intensité et la durée n'est pas liée à celles du stimulus déclenchant mais à un état interne,
- enfin les *comportements motivés* qui dépendent également de l'état interne de motivation; ces derniers se caractérisent par le groupement et le séquençage de comportements de base, leur orientation vers un but, leur spontanéité dans le sens qu'aucun stimulus externe n'est nécessaire à leur déclenchement, leur variation d'intensité dans leur réponse, en fonction du degré de motivation, leur persistance malgré la disparition de stimulus externe et leur faculté d'apprentissage associatif.

De plus, leur travail comprend une expérimentation à travers la simulation d'un insecte constitué de six pattes et deux antennes. Il est muni de différents capteurs tactiles et chimiques et possède un état interne d'énergie. Cette énergie est consommée régulièrement par le métabolisme et peut s'accroître par la capacité de l'insecte à s'alimenter. L'objectif est de construire un insecte qui puisse survivre dans un environnement où il peut puiser de la nourriture dont l'odeur est propagée en fonction de la quantité de nourriture et de la distance la séparant de l'insecte. Si le niveau d'énergie atteint la valeur zéro, l'insecte meurt.

Les comportements de base dont est doté l'insecte sont

- la *locomotion*: capacité de se mouvoir en ligne droite par une coordination adéquate des six pattes en évitant à l'insecte d'être déséquilibré,

### 3. L'autonomie par l'action

- l'errance: locomotion introduisant aléatoirement des forces latérales générant des rotations,
- le suivi des bords détectés d'obstacles (taxie): maintien de l'angle avec un obstacle détecté par contact des antennes,
- enfin, l'alimentation (schéma d'actions): orientation de la locomotion en fonction d'un état de faim et du champs d'odeurs détecté (taxie), et consommation de la nourriture une fois détectée (schéma d'actions).

De plus un mécanisme de contrôle des interactions entre ces capacités comportementales est introduit.

### Support neurobiologique du comportement animal

Les auteurs s'intéressent à la reconstitution de la structure du système nerveux sous-jacente aux comportements décrits. Ils recherchent le type d'organisation nécessaire à expliquer l'émergence des principes observés dans les comportements. La réponse se situe à deux niveaux: les types de connexions et la dynamique des circuits neuronaux.

Les différents niveaux de comportements se distinguent, en effet, par la complexité des connexions menant de la perception à l'action.

Les réflexes se caractérisent essentiellement par des connexions directes entre neurones sensoriels (reconnaissant des stimuli sensoriels) et les motoneurones (responsables de la réponse). Ces liaisons simples présupposent une analyse sensorielle rudimentaire et expliquent le caractère stéréotypé des réponses.

Les taxies sont également produites par des circuits simples permettant une comparaison de l'information des récepteurs sensoriels à différents endroits du corps afin de favoriser l'orientation de la réponse dans des attitudes d'attraction ou de répulsion.

Les schémas d'actions reposent sur des circuits plus complexes et encore peu étudiés permettant la génération de schémas d'activité moteur sur des intervalles temporels. L'explication donnée à des comportements rythmiques tels que la marche ou la nage est l'existence de circuits particuliers (circuits de pulsation); ils permettent d'expliquer la régulation sur la base de leur dynamique interne et des connexions inter-synaptiques entre circuits différents en exploitant en particulier des rétroactions sensorielles.

Dans leur application à la modélisation d'un insecte, leur modèle du neurone est à mi-chemin entre le neurone naturel, dont la dynamique interne est évolutive et peut être spontanée, et le modèle extrêmement simplifié rencontré dans l'approche connexionniste dont la dynamique est donnée par une fonction non-linéaire. Leur modèle se différencie de ces derniers essentiellement par l'introduction d'un courant intrinsèque, dépendant du temps, qui provoque sporadiquement des réponses spontanées. Cet ajout ne semble toutefois pas apporter de modification qualitative. Il va simplement dans le sens d'un neuro-mimétisme accru.

Deux types de connexions synaptiques sont également utilisées: l'une permettant à l'activité d'un neurone d'interrompre la connexion entre deux autres neurones, l'autre permettant d'en modifier l'intensité par un facteur multiplicatif.

Les architectures de circuits expérimentés sont pour la plupart inspirés de systèmes nerveux d'animaux "simples" tels que l'*Aplysia* (mollusque marin). Ainsi, pour leur comportement de locomotion, par exemple, ils utilisent pour chaque patte un circuit de sept neurones et dix connexions synaptiques excitatrices ou inhibitrices. L'un de ces neurones est partagé par les six pattes; il s'occupe de donner le rythme du mouvement coordonné<sup>22</sup>. L'équilibre de l'insecte

<sup>22</sup>Sur la figure 3.17, les pseudo-neurones *stance* et *swing* déterminent la force avec laquelle la patte avance ou recule. *Foot* détermine si la patte est en l'air ou posée. Le neurone *P* donne le rythme du mouvement alterné avant-arrière. Les deux neurones de droite provoquent le changement de position de la patte une fois l'angle maximal atteint dans un sens ou dans l'autre. Enfin, le déclenchement du tout dépend du degré d'activation du neurone *LC* qui correspond au besoin de locomotion. Les arcs correspondent aux connexions synaptiques: triangle = excitation, rond = inhibition.

## Modélisation d'un agent autonome

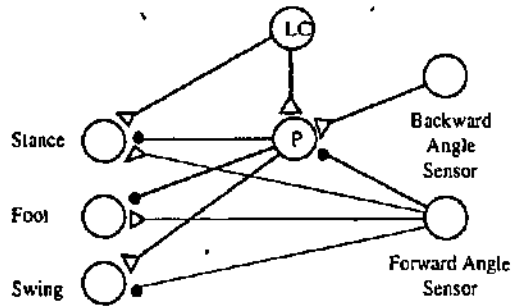


Figure 3.17 : Les neurones et leurs connexions synaptiques; circuit contrôleur d'une patte. (repris de [Beer-al.90])

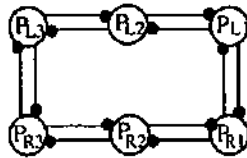


Figure 3.18 : Structure d'inhibition entre les circuits de pulsation de chaque patte, favorisant l'équilibre de l'agent. (repris de [Beer-al.90])

est assuré par l'application d'une règle simple sur la topologie des pattes; deux pattes adjacentes s'inhibent mutuellement, ce qui permet la synchronisation des pattes non-adjacentes.

Enfin, à travers leur simulation, cette architecture a permis d'observer deux phénomènes particuliers:

- l'étude du mouvement de l'ensemble des six pattes permet de s'intéresser aux traces au sol laissées par l'insecte, comme si celui-ci marchait sur un terrain enneigé. La succession des motifs de traces à des vitesses de marche différentes sont similaires à celles observées sur l'animal modélisé!
- en rapport avec la plasticité et la robustesse des comportements, l'insecte est résistant à certaines lésions internes portant sur la structure synaptique du circuit.

## Des germes de motivation

Sur la même base neurobiologique, les auteurs expliquent l'influence de l'état interne de l'animal sur son comportement, à travers:

- l'existence de cellules nerveuses individuelles dont la dynamique intrinsèque influence ces opérations,
- des boucles de rétroaction positive qui expliquent l'accroissement de l'activité,
- les interactions entre circuits différents,
- certains effets chimiques tels que les régulations hormonales.

Ces mécanismes apparaissent essentiellement dans le comportement d'alimentation traité dans leur travail. Un niveau trop bas d'énergie stimule le comportement d'orientation vers la nourriture sentie. À l'inverse, si l'insecte est rassasié après avoir ingurgité une grande quantité de nourriture, il peut avoir une tendance à s'éloigner des endroits de nourriture.

### 3. L'autonomie par l'action

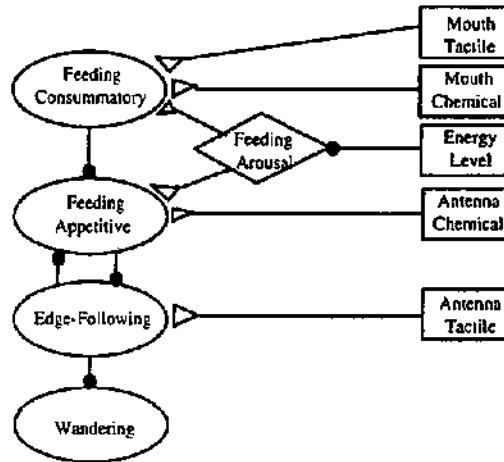


Figure 3.19 : Réseau de compétitions entre les différents circuits de comportements. Les ovales représentent les comportements, les rectangles sont les différents stimuli sensoriels et le losange donne le niveau de faim. (repris de [Beer-Chiel91])

#### Mécanismes de sélection

En relation avec le problème de la sélection d'actions, les auteurs se démarquent de l'*hypothèse du neurone commande* qui veut que l'information sensorielle converge vers un neurone unique activant les circuits moteurs adéquats tant qu'un stimulus sensoriel particulier est présent (la littérature parle de *grandmother cells* [Amit89]). Malgré la découverte de tels neurones dans certains organismes, l'explication du mécanisme de sélection uniquement par des cellules de ce genre serait une simplification excessive.

A l'inverse, le point de vue des auteurs s'oriente vers des circuits de neurones portant des processus distribués et permettant un consensus entre les circuits responsables des différents schémas comportementaux. Ce consensus est également réalisé à partir de mécanismes neuro-biologiques de même nature que ceux utilisés au niveau de chaque comportement. De nouveau, le séquençement des comportements dans le temps est porté par une structure d'excitation-inhibition particulière et l'intensité de la réponse est guidée par des circuits de rétroaction positive qui peuvent être alimentés par des neurones reproduisant certains états internes.

La sélection d'actions est donc réalisée par un processus résultant de connexions particulières entre les différents circuits qui génèrent la dynamique de chaque comportement. Ces connexions induisent certaines *compétitions* à des niveaux de complexité différents. Ces niveaux font apparaître une *hiérarchie de contrôle comportemental* qui, dans le cas du travail décrit, peut varier dans le temps en fonction de l'état de certaines variables internes. La figure 3.19 représente ce type d'architecture de contrôle.

#### Propriétés et limitations

Le travail de Beer, Chiel et Sterling se caractérise par une certaine pureté neuro-mimétique; en introduisant d'une part des simulations plus réalistes du neurone que celle du modèle formel de McCulloch, d'autre part et surtout, en étudiant des structures hétérogènes de petites quantités de neurones avec des objectifs très précis.

Cette pureté méthodologique leur permet de s'intéresser à l'observation de phénomènes caractéristiques des sciences de la biologie: l'effet des lésions neuronales sur le comportement et la plasticité, par exemple.

Une autre originalité de ce travail est d'utiliser le même mécanisme aussi bien dans la

réalisation de chacun des comportements de base que dans leur coordination. Toutefois, l'utilisation de ce mécanisme de compétition semble mieux adapté ou, en tout cas, mieux développé au niveau des comportements qu'au niveau du contrôle multi-comportemental.

Pourtant, et malgré l'originalité de l'approche, il faut relever que l'agent simulé possède une dizaine de capteurs et est composé de quelques dizaines de neurones alors que les insectes les plus simples intègrent plusieurs milliers de capteurs et un système nerveux composé de plusieurs milliers de neurones. Or, malgré la relative simplicité du système, la complexité de sa gestion a atteint les limites du maîtrisable; en effet, leur système possède déjà plusieurs centaines de paramètres à régler.

Ainsi, l'exemple traité dans leur travail est exemplaire et ne peut qu'attirer l'attention. Néanmoins, une méthodologie plus affinée est nécessaire pour construire des agents qui pourraient prétendre simuler le système nerveux du plus simple des insectes.

### 3.7.3 Commentaires

Les mécanismes de contrôle par compétition sont intéressants du fait qu'ils portent, à travers une structure particulière, une dynamique interne d'où émerge l'organisation comportementale du système. Nous avons vu que cette dynamique peut être portée par des éléments structurels très variés, suivant les travaux.

Pourtant, si l'émergence d'une coordination induite par une dynamique interne est intéressante, ces systèmes sont limités dans le sens où leur structure est figée; déterminée par les relations causales entre opérateurs (chez Maes) ou soigneusement construite par les concepteurs du système (chez Beer). Dans les deux cas que nous avons traités, cette structure fixe oblige à calibrer le système de façon très précise; ceci est particulièrement vrai dans le système de Maes où l'on a vu que, suivant les problèmes traités, certains calibrages sont reconnus empiriquement meilleurs.

Le système de Beer, malgré une structure fixe, possède l'avantage d'adapter individuellement l'influence des connexions.

Le fait de donner la structure au système constitue une limitation importante; de par la difficulté de la tâche et surtout de par le cadre limité donné à la dynamique. Il serait intéressant d'envisager une plasticité de la structure qui permettrait à l'agent de l'acquiescer et l'adapter par l'expérience. Pattie Maes semble d'ailleurs avoir été attirée par cette perspective et a proposé un mécanisme d'acquisition empirique des liens entre ses opérateurs. Malheureusement, bien que les poids des liens soient remis en question et adaptés, ces liens sont toujours déterminés par la spécification des préconditions et postconditions des opérateurs. Il nous semble essentiel de rendre également adaptatif le contenu de la description des effets des opérateurs.

Notre travail apporte une contribution dans ce sens du fait qu'il laisse à l'agent la tâche de spécifier les effets de chacun des comportements aussi bien que les liens causaux entre comportements, sur la base de ses expériences.

## 3.8 Le contrôle connexionniste

Le contrôle connexionniste englobe plus qu'une architecture particulière de contrôle dans le sens de notre taxinomie; il s'agit d'une classe d'architectures se caractérisant par le fait d'utiliser des techniques connexionnistes.

Nous allons donc passer en revue un ensemble d'architectures variées, tant par leur structure que par leur dynamique. Cette variété fait que le type de contrôle que nous avons appelé connexionniste puisse offrir des réponses aussi bien au problème de la sélection d'actions qu'à celui de l'intégration comportementale.

Ce type de contrôle partage les intérêts du *paradigme connexionniste*. En ce sens, il a pour sujets de prédilection l'apprentissage, l'adaptation au milieu et l'optimisation. Il vient ainsi combler le manque de flexibilité présenté par les architectures décrites précédemment.

### 3. L'autonomie par l'action

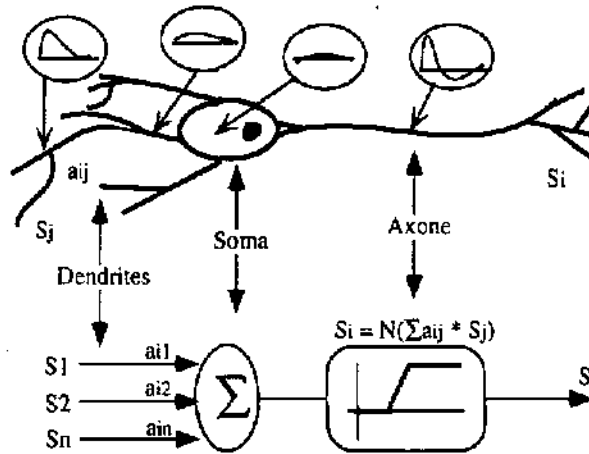


Figure 3.20 : Le neurone biologique et le neurone formel. (repris de [Hérault89])

Le paradigme connexionniste étant le cadre des architectures de contrôle présentées ici, nous allons commencer par en rappeler les généralités. Nous illustrons ensuite les solutions proposées à la problématique du contrôle comportemental à travers les réseaux de neurones artificiels classiques et les récents travaux s'inspirant de la morphodynamique.

#### 3.8.1 Généralités

Le connexionnisme couvre différents courants de recherche qui ont la particularité de s'intéresser à la modélisation de la structure des systèmes cognitifs et à la simulation de leurs fonctionnalités en s'inspirant de l'anatomie et des fonctions connues du système nerveux. Ce courant représente avant tout une nouvelle perspective de recherche, alternative au cognitivisme. A l'IA fonctionnelle, il préfère l'IA structurelle. A l'observation macroscopique, il préfère la dissection microscopique. Toutefois, la notion de représentation leur est commune bien que le connexionnisme désavoue la nature symbolique<sup>23</sup> de celle-ci.

Sans prétendre reconstruire une machine similaire au cerveau humain, il s'agit de créer des modèles simplifiés du neurone et d'étudier les propriétés de différentes organisations neuronales appelées architectures connexionnistes.

Les pionniers de ce domaine sont McCulloch et Pitts qui, en 1943, proposèrent un modèle de neurone formel (le perceptron) et montrèrent que différentes combinaisons de ces neurones en des séquences temporelles permettaient de reconstituer toutes les opérations de la logique binaire [McCulloch-Pitts43]. Ainsi, par des configurations adéquates et des équations dynamiques simples, les réseaux de neurones permettaient d'exprimer des capacités cognitives élémentaires. Leurs travaux sont néanmoins restés dans l'ombre du cognitivisme jusqu'au début des années 80. De nos jours, plusieurs techniques sont bien maîtrisées grâce à des formalismes adéquats et aux nouvelles possibilités de simulation offertes par des ordinateurs de plus en plus performants. De nombreux travaux théoriques sont en cours.

L'architecture générale de l'approche connexionniste est appelée réseau de neurones artificiels (RNA dans la suite). Elle se caractérise par un grand nombre d'unités de traitement élémentaires, similaires, conceptuellement ou réellement parallèles et censées modéliser le neurone biologique<sup>24</sup>. Enfin, chaque type de RNA se caractérise par des connexions et des traite-

<sup>23</sup> Les termes de représentation sub-symbolique ou infra-symbolique apparaissent dans la littérature (voir [Ducret89] pour une discussion générale sur les approches symbolique et infra-symbolique de la représentation).

<sup>24</sup> Il est important de garder en mémoire qu'il s'agit d'un modèle formel introduisant inévitablement des

ments différents entre ces unités ou neurones.

D'un point de vue épistémologique, l'approche connexionniste a contribué à l'essor des sciences cognitives. D'un point de vue pragmatique, la caractéristique essentielle de cette approche est de fournir des RNA pour lesquels

- le traitement de l'information est totalement distribué à travers la structure; ce traitement peut être parallélisé conceptuellement (pseudo-parallélisme) ou réellement (la technologie des circuits intégrés en donne la possibilité [Vittoz89]),
- l'information, comme son traitement, est totalement distribuée à travers la structure. Cette caractéristique débouche sur une robustesse au dysfonctionnement d'un petit nombre d'éléments du réseau et une faible sensibilité aux perturbations (bruit),
- la connaissance du réseau (connaissance à long terme) est codée dans les poids synaptiques associés aux connexions. Ces poids peuvent être donnés a priori mais sont généralement acquis par le système lui-même grâce à des techniques d'apprentissage, ce qui permet au RNA de s'auto-organiser, de s'adapter aux conditions rencontrées. La connaissance à long terme peut donc être évolutive. Cette caractéristique en fait un outil puissant pour l'acquisition de connaissances difficilement formalisables (calibrage, optimisation, acquisition de règles de décision floues),
- l'état du système (connaissance à court terme) est donné par l'ensemble des états des neurones,
- enfin, la fonction réalisée par le système est dépendante de la topologie des connexions entre neurones (sa structure), de l'intensité des connexions (sa connaissance) et du type de traitement réalisé au niveau de chaque neurone.

L'approche connexionniste "forte" consiste à supposer que les RNA permettent de simuler les fonctions cognitives et donc d'expliquer la cognition et ses mécanismes. Dans une approche plus "faible", elle constitue un paradigme permettant de couvrir une grande variété de systèmes allant des systèmes dynamiques aux systèmes complexes<sup>25</sup>.

Depuis les années 80, le connexionnisme s'est illustré dans des domaines aussi variés que ceux de la reconnaissance de formes visuelles (images) ou vocales (parole), de l'apprentissage et du contrôle de la motricité, de la classification [Kohonen89], de la mémorisation associative [Kamp-Hasler90] ou de la séparation de signaux indépendants [Jutten-Hérault88].

Dans le domaine des systèmes autonomes, les RNAs sont généralement appliqués à des tâches pré-symboliques telles que le pré-traitement de données ou la classification. Le résultat de ces traitements est ensuite injecté dans un système symbolique pour des traitements à de plus hauts niveaux d'abstraction.

De par leurs propriétés, les RNAs sont, depuis peu, appliqués à la construction de comportements de base [Nehmzow-al.90, Franceschini92, Collins-Jefferson91]; il s'agit, à partir d'un ensemble de données capteurs, de fournir une commande aux effecteurs qui permette de satisfaire un ensemble de contraintes caractérisant le comportement souhaité. Dans ce cas, on peut considérer que les deux approches du contrôle sont traitées; soit la réponse est vue comme le résultat d'une fusion sensorielle et c'est alors le problème de l'intégration qui est traité (sur les données capteurs et pas sur des comportements), soit la réponse est vue comme un choix parmi une ensemble de solutions possibles et c'est alors le problème de la sélection d'actions qui est traité.

---

simplifications par rapport au neurone naturel. En particulier, le mécanisme de propagation d'activité supporté par les neurotransmetteurs est fortement simplifié.

<sup>25</sup>Suivant la classification des systèmes dynamiques en fonction de leur nombre de composants (petit ou grand), leur type d'interaction (faibles ou quelconques) et la nature des composants (identiques ou différents), Gérard Weisbuch énumère les *systèmes linéaires* (g-f-d), la *mécanique statistique* (g-q-i), les *systèmes différentiels non linéaires* (p-q-d) et les *réseaux d'automates* (g-q-d). [Weisbuch89]. (voir également [Kiss91])

### 3. L'autonomie par l'action

En ce qui concerne le contrôle multi-comportemental l'application des RNAs est moins développée [Sorouchyari89, Verschure-al.92, Touzet94]. Dans ce cas également, les deux approches (sélection d'actions ou intégration comportementale) peuvent être traitées.

Nous allons donner les éléments essentiels de chacun de ces domaines d'application dans le cadre de la modélisation d'agents autonomes.

D'autre part, nous mentionnons de récents travaux en morphodynamique qui s'intéressent à l'évolution simultanée de la dynamique et de la structure des RNAs. Ces travaux, pour l'instant appliqués principalement aux problèmes de la classification et de l'approximation de fonctions, laissent envisager un saut qualitatif dans l'apport du courant connexionniste au problème du contrôle et, plus généralement, aux sciences de la cognition.

#### 3.8.2 Les réseaux de neurones

##### Apprentissage supervisé et non-supervisé

La variété d'algorithmes d'apprentissage proposés par le paradigme connexionniste peut être classés en deux catégories globales: l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non-supervisé. Le choix du type d'apprentissage à entreprendre est déterminé par la nature du problème et les connaissances qu'en a le concepteur.

L'*apprentissage supervisé* est possible lorsque des couples  $(x_i, y_i)$  d'entrées-sorties correspondant au problème à apprendre sont connus. Dans ce cas, il s'agit pour le système d'apprendre à prédire la sortie  $y_i$  correspondant à l'entrée  $x_i$  qu'on lui fournit. En phase d'apprentissage on lui fait apprendre successivement ces associations.

Imaginons qu'il s'agisse d'apprendre une fonction continue  $f$  telle que  $y_i = f(x_i)$ ; la donnée au système d'un ensemble de couples entrée-sortie en phase d'apprentissage permettra d'approcher la fonction de telle sorte que, dans une deuxième phase d'exploitation ou d'évaluation du système, ce dernier pourra approcher les valeurs  $y_i$  correspondant à des  $x_i$  n'apparaissant pas dans l'ensemble de couples introduits en phase d'apprentissage. Le système aura donc appris à approcher la fonction  $f$  grâce à une phase où l'utilisateur (ou superviseur) lui aura énuméré un sous-ensemble d'associations caractéristiques de la fonction.

L'*apprentissage non-supervisé* est nécessaire lorsque l'on ne connaît que les  $x_i$  (entrées). Dans ce cas, le problème consiste à classifier l'ensemble des  $x_i$  connus.

Un cas particulier d'apprentissage non-supervisé est l'apprentissage par renforcement; il est réalisable lorsqu'on possède un critère de punition-récompense permettant de juger de la qualité de la classification faite. Ce critère est donné au système qui peut dès lors s'auto-superviser.

L'apprentissage par renforcement peut évidemment être vu comme une technique supervisée. Disons qu'il s'agit d'un cas intermédiaire.

##### Apprentissage comportemental

Dans la construction d'un comportement souhaité, l'idée générale est de lier les capteurs aux effecteurs du système par un RNA particulier. Le nombre de combinaisons entrées-sorties possibles pose un premier problème théorique: quelle architecture choisir? La figure 3.21 représente cette approche.

Les deux types d'apprentissages (supervisé ou non) peuvent être utilisés, suivant que le comportement à apprendre soit formalisable ou non.

Généralement, lorsque la commande moteur correspondant à chacune des configurations possibles des données capteurs (entrées) est connue, c'est un algorithme supervisé qui est utilisé.

Dans ce cas, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage n'est qu'à moitié justifié. En effet, ces comportements peuvent généralement s'exprimer sous la forme de règles simples telles que "avancer tant qu'aucun obstacle n'est détecté devant, s'arrêter sinon". De tels comportements peuvent facilement être implantés en programmation classique. Différents langages,

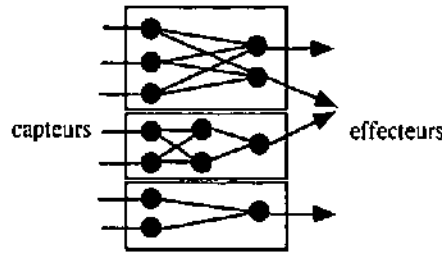


Figure 3.21 : Structure connexionniste de comportements.

certains même spécialisés, sont utilisés: [Brooks87a] utilise un langage similaire à LISP, [Donnet-Smithers91] et [Resnick91] proposent des langages proches de Pascal alors que, dans notre laboratoire, nous programmons nos comportements soit en LISP, soit en C.

Pourtant, bien qu'une formalisation du comportement et sa programmation soient envisageables, l'approche connexionniste permet d'éviter des tests extrêmement longs pour calibrer "à la main" le comportement programmé. De plus un paramétrage particulier fige le comportement alors que l'approche connexionniste permet de rester flexible aux variations des caractéristiques de l'environnement.

L'avantage essentiel de l'apprentissage est de permettre de produire des comportements pour lesquels une caractérisation générale est difficile à formuler et donc à programmer. Dans ce cas, ce sont des algorithmes non-supervisés qui sont utilisés; l'apprentissage par renforcement en est un exemple<sup>26</sup>.

L'algorithme est basé sur un critère donné par le concepteur du système (choc ou non-choc, par exemple). Ce critère permet de juger chaque action réalisée en fonction des données observées et de récompenser ou non le choix réalisé. Le but du système d'apprentissage est de répondre aux entrées de façon à récolter le plus grand nombre possible de récompenses.

La problématique générale du choix de l'action apparaît également dans le cadre de l'apprentissage. Lors de chaque nouvelle configuration d'entrée, le système doit réaliser une association qu'il n'a pas eu l'occasion de tester. Un choix aléatoire de la réponse à cette nouvelle configuration d'entrée n'est certainement pas optimal. Il est toutefois difficile de tenir compte des combinaisons déjà expérimentées pour choisir la réponse. En général, la solution proposée consiste à maintenir une certaine continuité de la réponse pour des situations ressemblantes.

Dans la problématique de conception d'agents autonomes, la mise au point de comportements de base offre des applications intéressantes aux techniques d'apprentissage connexionnistes.

[Nehmzow-al.90] présente le système RUR (*Really Useful Robot*) qui, à travers les réseaux de Kohonen (apprentissage non-supervisé) et la *backpropagation*, démontre l'apprentissage par le robot du comportement général d'évitement d'obstacles dans un environnement inconnu.

Sur la base d'une étude minutieuse de l'anatomie et de la fonction de l'oeil composite de la mouche, Franceschini et ses collaborateurs décrivent également un travail connexionniste intéressant appliqué à la robotique mobile (voir [Pichon-al.89], [Franceschini92]). Leur intérêt porte plus sur la structure connexionniste que sur les algorithmes d'apprentissage. Les auteurs ont reconstitué les circuits et le type de traitement du signal observé chez la mouche. Ceci permet au robot, une fois ce système couplé aux effecteurs, d'éviter les obstacles en se dirigeant vers une source lumineuse de façon "hyper-réactive" et sans intervenir dans le monde autrement que par son mouvement (à l'inverse de la plupart des capteurs qui émettent des signaux dans le monde pour mesurer les données pertinentes).

<sup>26</sup> Voir [Pearce-Kuipers91], [Schmidhuber91], [Sutton91], [Bersini-Gonzalez93] ou [Dorigo-Bersini94] pour des exemples d'applications de techniques d'apprentissage par renforcement à des agents comportementaux.

### 3. L'autonomie par l'action

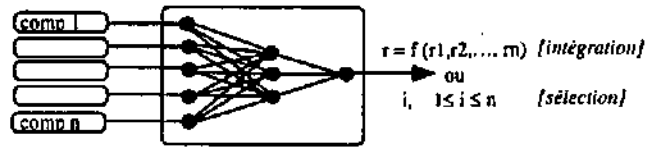


Figure 3.22 : Mécanisme connexionniste de sélection d'action.

D'autres travaux tels que [Booker91] ou [Koza91], à travers des techniques du domaine des algorithmes génétiques, illustrent également l'apprentissage comportemental connexionniste.

Les problèmes liés à l'utilisation d'algorithmes connexionnistes dans le cadre de l'apprentissage comportemental sont néanmoins importants:

- Le temps d'apprentissage est long; plusieurs milliers d'essais sont nécessaires à l'apparition d'un comportement structuré et cohérent. Néanmoins, et par opposition au calibrage d'un comportement programmé, il suffit au concepteur d'analyser le comportement final, sans qu'il soit nécessaire d'assister à toute la phase d'apprentissage.
  - Il est difficile pour un concepteur de s'assurer de la qualité de l'apprentissage car on ne sait pas ce qu'il fait réellement (la connaissance est numérique et totalement distribuée).
  - On observe une sensibilité à l'ordre des expériences et la fréquence d'expériences semblables: certaines séquences d'expériences peuvent faire que le système limite ses réponses à une partie de l'espace des sorties possibles, en ignorant des réponses plus adaptées.
  - Le choix d'un réseau particulier fixe la capacité (volume) de mémoire: il est difficile d'estimer la taille du réseau nécessaire en rapport avec la complexité d'un comportement. La connaissance liée à un comportement étant contenue dans la matrice des poids des connexions entre neurones, plus il y a de connexions et plus le comportement est susceptible d'être varié, flexible et précis.
- Ces déficiences sont le prix à payer pour une flexibilité de traitement, une robustesse au dysfonctionnements, une faible sensibilité au bruit et une distribution (répartition) des traitements. Elles sont intrinsèques aux algorithmes d'apprentissage proposés par le connexionnisme et donc communes à n'importe quel type d'application.

#### Contrôle multi-comportemental connexionniste

Le contrôle multi-comportemental connexionniste peut être envisagé sous deux formes:

- Comme une généralisation de l'apprentissage comportemental où un RNA intègre un ensemble de RNAs primaires pour former un comportement plus complexe. Dans ce cas, on retombe dans la problématique de construction d'un comportement. Cette approche possède des similarités avec celle du contrôle par fusion exposée précédemment; elle répond au problème de l'intégration comportementale.
- Comme un mécanisme connexionniste de sélection d'action dont la réponse correspond à l'identité du comportement sélectionné. Ce sont généralement des séquences de comportements qui sont apprises dans ce genre d'applications [Colombetti-Dorigo93].

Ces deux approches sont illustrées par la figure 3.22.

### 3.8.3 La morphodynamique

Dans le prolongement de l'approche connexionniste comportementale, nous mentionnons une approche connexionniste structurelle basée sur la théorie de la morphodynamique et interprétée à la lumière de la théorie de l'autopoïèse (voir l'introduction générale, paragraphe 1.5.2).

Le but est d'insister sur le double apport de la théorie de la morphodynamique; non seulement elle aboutit à l'ajout d'une dynamique structurelle (adaptation de la structure d'organisation) à la dynamique événementielle des réseaux de neurones artificiels classiques (adaptation d'une organisation particulière), mais elle permet de coupler ces deux dynamiques. L'adaptation est double et fortement imbriquée<sup>27</sup>.

#### Fondements

La morphodynamique est un domaine d'étude des mathématiques [Petitot92b]. Dans ce cadre, un modèle morphodynamique est un modèle dynamique de structuration morphologique [Petitot92a]. La morphodynamique connexionniste s'en inspire et se décrit comme la partie expérimentale de cette théorie.

D'autre part, en IA, la structure de graphe est une structure privilégiée aussi bien dans le courant cognitiviste (graphes d'héritages, graphes temporels, réseaux sémantiques<sup>28</sup>, réseaux bayésiens<sup>29</sup>) que dans le courant connexionniste (RNAs).

Les réseaux morphodynamiques proposent d'élargir le formalisme connexionniste à des structures topologiques variées qui permettent des traitements intégrant la transformation et la régénération des composants du réseau. Cette approche situe l'intelligence d'un système au niveau de sa capacité d'auto-structuration sous l'influence de contraintes externes.

Les analogies avec la notion d'autopoïèse sont manifestes<sup>30</sup>.

#### Le dilemme de l'apprentissage

L'apprentissage classique (à structure fixe) correspond à l'acquisition d'une description d'un phénomène (ensemble des valeurs d'apprentissage). Le choix d'une structure correspond à la donnée d'un ensemble d'hypothèses susceptibles de favoriser cette description; elle donne un cadre à l'acquisition. Le dilemme de l'apprentissage porte sur la taille de l'ensemble d'hypothèses à construire.

Guillaume Deffuant formule ce dilemme de la façon suivante:

- (a) l'élargissement de l'ensemble d'hypothèses admissibles augmente le nombre de phénomènes compatibles avec certaines de ces hypothèses, mais réduit la valeur prédictive de telles hypothèses,
- (b) inversement, la restriction de l'ensemble d'hypothèses admissibles réduit le nombre de phénomènes compatibles avec certaines de ces hypothèses, mais augmente leur valeur prédictive.

Depuis les travaux de Charles Peirce [Hartsthorne-Weiss31], l'*abduction* et l'*induction* sont connues comme étant deux mécanismes de construction d'hypothèses. Avec la déduction, ils forment les trois schémas d'inférence caractérisant les modèles logiques de raisonnement. Dans ce cadre, l'*abduction* correspond à la construction d'une hypothèse permettant d'expliquer un

<sup>27</sup>Deffuant parle d'*adaptation passive* et d'*adaptation active* respectivement.

<sup>28</sup>Grappe dont les noeuds représentent des objets ou des concepts et les arcs des relations (généralement binaires) entre concepts. Ces réseaux servent donc à représenter certains types de connaissances: hiérarchies, proximités ou taxinomies entre concepts.

<sup>29</sup>Grappe orienté acyclique dont les noeuds correspondent à des variables aléatoires et des décisions, les arcs à des influences causales ou probabilistes et les poids des arcs à des probabilités conditionnelles. Ces réseaux sont utilisés en raisonnement approximatif.

<sup>30</sup>Pour un développement de ces analogies, voir [Deffuant92] qui les fait ressortir très clairement.

### 3. L'autonomie par l'action

ensemble de faits observés accumulés (cette hypothèse, explicative à l'instant  $t$ , pourra être contredite par un nouveau fait observé ultérieurement)<sup>31</sup>. L'induction correspond au passage d'une vérité factuelle à une autre jugée telle en raison de son lien avec la première.

C'est en conservant cette interprétation que l'on peut associer l'acquisition d'une description d'un phénomène observé à la capacité d'induction, alors que la construction de l'ensemble d'hypothèses prises en compte par l'acquisition correspond à la capacité d'abduction.

Ainsi, le dilemme de l'apprentissage peut s'exprimer en termes d'abduction et d'induction, ces deux capacités apparaissant alors comme fortement liées<sup>32</sup>.

### Une double dynamique d'adaptation

Les contraintes mutuelles entre ces dynamiques poussent à rechercher des mécanismes permettant de les intégrer en un même système.

Dans les architectures connexionnistes, ces dynamiques peuvent correspondre à l'ajustement des composants (adaptation passive, induction) et au renouvellement de ces mêmes composants (adaptation active, abduction).

Certaines techniques connexionnistes ont déjà tenté d'intégrer ces dynamiques (ART, pour *Adaptive Resonance Theory* [Carpenter-Grossberg87]). Le problème réside dans la conception des influences mutuelles entre ces dynamiques. La morphodynamique permet de leur donner une interprétation géométrique, ce qui permet de modéliser l'approche.

Deffuant décrit un système morphodynamique et les dynamiques d'abduction et d'induction sur cette structure de la façon suivante [Deffuant93]:

$S$  représente le système global formé de composants,  $E$  l'environnement du système et  $x$  et  $y$  deux composants quelconques du système.

Les dynamiques sont décrites par les équations suivantes:

1. Chaque composant peut modifier ses paramètres sous l'effet d'influences internes et/ou externes au système. Ainsi, chaque composant s'*ajuste* suivant la dynamique

$$\partial x = A(x, S, E)$$

2. Chaque composant peut être créé, détruit ou lié à un autre composant:

- la probabilité pour un composant d'être *créé* est donnée par la fonction

$$P_C(x) = C(x, S, E)$$

- la probabilité de *destruction* d'un composant est donnée par la fonction

$$P_D(x) = D(x, S, E)$$

- la probabilité de *liaison* de deux composants  $x$  et  $y$  est donnée par la fonction

$$P_L(x, y) = L(x, y, S, E)$$

La liaison de deux composants introduit certaines contraintes sur leurs paramètres.

---

<sup>31</sup> En fait, Peirce définit l'abduction comme étant "une certaine capacité de l'esprit humain à deviner l'hypothèse qu'il faut soumettre à l'expérience, laissant de côté sans les examiner la vaste majorité des hypothèses possibles".

<sup>32</sup> On notera l'analogie évidente avec les dynamiques de l'autopoïèse (régénération de processus et concrétisation de ceux-ci dans un espace donné), moins évidente mais tout aussi concrète avec les concepts d'assimilation et d'accommodation de la théorie piagétienne.

La première dynamique sert à adapter les composants étant donnée une morphologie particulière. Elle correspond à une phase d'induction.

La seconde dynamique sert à adapter la morphologie du système qui affectera la première dynamique. Elle correspond à une phase d'abduction.

Enfin, ce type d'approche a été appliquée à des structures connexionnistes. Guillaume Deffuant a développé le modèle des *membranes de perceptrons* et en a étudié l'application aux problèmes de la classification, de l'approximation de fonctions, et du contrôle. Etienne Monneret [Deffuant- Monneret93] introduit le modèle des *fibres adaptatives* et l'utilise en reconnaissance de lettres et de mots par application réflexive du modèle.

Pour terminer cette brève présentation des réseaux morphodynamiques, disons que mis à part l'apport théorique de cette approche au mouvement connexionniste, nous partageons l'avis de Deffuant lorsqu'il déclare "si cette approche tient ses promesses pour d'autres modèles encore, il s'agira d'un changement d'orientation important pour les sciences cognitives".

### 3.8.4 Commentaires

L'approche connexionniste s'est pour l'instant essentiellement penchée sur le problème de génération de comportements de bas niveaux dans le domaine du contrôle comportemental. Certaines techniques sont néanmoins adaptées aussi bien au problème de la sélection d'actions qu'à celui de l'intégration comportementale. Elles commencent à donner des résultats intéressants.

Une approche qualitativement nouvelle est celle des architectures morphodynamiques. L'idée globale est de s'intéresser à deux dynamiques à la fois: l'adaptation passive ou induction et l'adaptation active ou abduction. La caractéristique principale est celle de coupler ces deux dynamiques ce qui constitue une bonne façon d'aborder le dilemme de l'apprentissage.

Cette approche est récente, prometteuse et doublement intéressante; elle améliore les capacités des réseaux connexionnistes et, surtout, sa source d'inspiration (l'autopoïèse, en particulier) fait aborder le problème de l'apprentissage sous un point de vue nouveau, celui de l'autonomie.

## 3.9 Conclusion

Bien que le mouvement comportementaliste lié à la problématique des systèmes autonomes puisse être présenté comme une réaction au mouvement cognitiviste de l'IA traditionnelle, ce chapitre tend à montrer qu'il va bien au delà. Nous retenons de l'approche comportementaliste:

- Son intérêt pour l'activité en tant qu'élément essentiel à l'autonomie; c'est dans cette approche que la réaction au cognitivisme se fait le plus sentir. Néanmoins, les travaux de ces dernières années tendent à reconsidérer les capacités de raisonnement sous une nouvelle optique (dans le prolongement de l'activité).
- La variété de solutions proposées au problème du contrôle comportemental (tant au niveau des architectures qu'à l'intérieur de chaque type d'architecture).
- L'adéquation des systèmes proposés face aux problèmes posés; temps de réponse adaptés (réactivité), robustesse au bruit, flexibilité face à l'imprévu.
- Elle constitue un paradigme dans lequel peuvent se reconnaître des chercheurs de différentes disciplines, spécialement des sciences cognitives. Elle s'alimente donc naturellement des fruits de travaux interdisciplinaires qu'elle réussit à fomentier. Le domaine reste largement ouvert et bien établi comme le prouve sa contribution à des domaines d'études aussi variés que l'IA Distribuée, la vie artificielle, les théories de l'apprentissage, la complexité ou l'autonomie.

### 3. L'autonomie par l'action

- De nombreuses voies de recherche sont offertes; nous avons vu que certaines approches ont été peu explorées (architectures hiérarchiques, morphodynamique) et que la capacité d'adaptation de la majorité des méthodes de contrôle sont pratiquement nulles.

Par contre les agents proposés par le courant comportementaliste ne répondent qu'à une partie (importante il est vrai) des caractéristiques nécessaires à l'autonomie. La raison principale est l'absence de capacités délibératives, permettant à l'agent de prédire, d'anticiper et de raisonner à long terme.

Les techniques d'apprentissage actuellement utilisées permettent de le faire sur le court terme (séquences d'actions). Cela ne suffit pas; l'agent nécessite des connaissances plus larges et adaptées afin d'éviter d'être encore fortement dirigé par son environnement. Dans ce sens, des propriétés telles que la capacité de mémorisation, d'acquisition et structuration des connaissances, d'abduction et de prédiction sont essentielles.

Ainsi, un traitement situé de l'activité permet de placer des systèmes dans des environnements complexes. Il faut encore que cette activité lui serve à favoriser son autonomie.

## *Modélisation d'un agent autonome*

# Approches hybrides

## 4.1 Introduction

C'est dans le prolongement des approches cognitiviste et comportementaliste que s'inscrivent les récents travaux proposant une approche hybride à la modélisation d'agents autonomes.

Rappelons que le paradigme cognitiviste, en se basant sur la métaphore computationnelle, propose des mécanismes généraux de *raisonnement* (la génération de plans d'actions, en particulier) basés sur des modèles (symboliques) du monde. Cette approche se désintéresse de la nature de l'activité<sup>1</sup>. A l'opposé, le paradigme comportementaliste propose des mécanismes pour le contrôle d'une *activité située* et donc réactive, sans utiliser de représentation interne. Cette deuxième approche se désintéresse du raisonnement à long terme.

L'approche hybride aspire à intégrer l'action située et le raisonnement à long terme en un même système de contrôle.

Après l'autonomie en tant que raisonnement (cognitivism) et l'autonomie en tant qu'action (comportementalisme), une autonomie hybride, associant raisonnement et action, est convoitée. Ainsi, si l'autonomie délibérative s'est développée essentiellement dans les années 70 et si l'autonomie réactive s'est développée dans la seconde partie des années 80, cette fin de siècle devrait se caractériser par une approche de l'autonomie hybride (réactive et délibérative à la fois).

Cette nouvelle phase ne s'inspire pas uniquement des deux courants l'ayant précédée, elle s'inscrit dans un courant scientifique plus large qui reconsidère des questions fondamentales liées à la cognition. La nature et l'origine de la connaissance et des activités mentales y sont vues sous un angle nouveau. De même, l'interaction du sujet avec son milieu intervient aussi bien dans le contenu que dans la genèse de cette cognition.

L'évolution de la notion d'autonomie en IA se reflète également dans les sources d'inspiration de ces trois courants successifs; après l'Homme pour le courant cognitiviste et l'insecte pour le courant comportementaliste, c'est au tour du rat, du singe ou même de l'enfant d'apporter des réponses au phénomène d'autonomie.

Ainsi, en ce qui concerne les architectures de contrôle ou les sources d'inspiration, l'approche hybride évite les extrêmes et aborde l'intégration, le compromis, l'équilibre.

Enfin, si la source d'inspiration a migré à travers les espèces vivantes au cours du temps, la robotique mobile semble s'affirmer comme un domaine d'application suffisamment riche et complexe pour proposer des cadres réalistes d'expérimentation et susciter des questions pertinentes face à la double problématique de compréhension de l'autonomie et de réalisation de systèmes autonomes.

Cette perspective hybride est trop récente en IA pour pouvoir parler d'un nouveau paradigme; les travaux étant encore peu nombreux et relativement distants entre eux, il nous semble prématuré de vouloir en établir les fondements.

Cependant, une preuve de maturité s'en dégage; par opposition aux courants cognitiviste et comportementaliste, ni l'activité située et donc l'enracinement de l'action dans le contexte, ni la représentation des connaissances comme support de capacités délibératives n'y sont négligées ou

<sup>1</sup> Soit l'action est supposée déterministe et son effet est donc prévisible, soit les effets imprévus sont rattrapés par une phase de replanification.

rejetées. Au contraire, ces deux caractéristiques sont revalorisées par des modèles leur donnant une nouvelle cohérence commune.

Ce chapitre commence par formuler la problématique de l'approche hybride en rapport aux paradigmes cognitiviste et comportementaliste. Il expose ensuite les deux types de solutions proposées dans la littérature. Trois travaux caractéristiques sont ensuite brièvement décrits.

La conclusion souligne la trace laissée par les paradigmes cognitiviste et comportementaliste sur ce courant hybride, constate la nécessité d'une réflexion plus profonde au sujet de l'autonomie et évalue l'écart entre la problématique de l'approche hybride et les solutions déjà proposées.

## 4.2 Problématique

L'intégration du raisonnement et de l'action demande de coupler ces deux facultés et d'analyser leurs influences réciproques.

Par rapport à l'approche cognitiviste, trois nouvelles caractéristiques apparaissent:

- En premier lieu, le raisonnement ne sert plus à résoudre des problèmes formalisés en exploitant des heuristiques et des algorithmes de complexité exponentielle. Il sert à coordonner une activité de nature située (ensemble de comportements). Les contraintes de temps de réponse poussent à abandonner les techniques classiques de génération de plans d'actions et à envisager des mécanismes plus réactifs de coordination de l'activité offrant des réponses acceptables dans des temps acceptables. Si le raisonnement se fait *off-line* dans le paradigme cognitiviste, il se doit d'être fait *on-line* dans une perspective d'intégration à l'action qu'il contrôle.
- L'hypothèse forte d'action déterministe, souvent réalisée dans le paradigme cognitiviste, est exclue dans l'approche hybride. *Le raisonnement doit tenir compte de l'effet de l'action qu'il choisit.* En effet, l'environnement, l'activité du système et le bruit intrinsèque à toute application tant soit peu réaliste introduisent des perturbations dans le déroulement des événements. Une confrontation de la prévision et de l'observation doit être réalisée dans le but de maintenir une cohérence interne et favoriser ainsi le bien-fondé des choix ultérieurs.
- Enfin, la connaissance ne porte plus exclusivement sur le monde. Il s'agit de reconsidérer la question fondamentale du type de connaissance adapté à l'intégration du raisonnement et de l'action. Le raisonnement portant sur l'activité, la représentation se doit d'exprimer certaines propriétés de l'action.

Par rapport à l'approche comportementaliste, trois nouvelles caractéristiques apparaissent également:

- A la différence des architectures comportementales, un système hybride intègre des connaissances sur lesquelles se fondent les mécanismes de raisonnement. Dès lors, plusieurs questions apparaissent: Quelle est la *contribution du comportement à cette représentation*? Le comportement gère-t-il une connaissance interne, spécifique à ses traitements? Partage-t-il sa connaissance avec d'autres comportements ou avec différents mécanismes de raisonnement?
- Dans un système hybride, il s'agit de déterminer les *mécanismes de contrôle que le comportement doit offrir* pour faciliter son contrôle.

La question est, avant tout, d'ordre architectural; il s'agit de prévoir une structure de contrôle adéquate à ce besoin d'intégration.

Elle est également d'ordre conceptuel; le comportement peut être simplement sélectionné par les mécanismes de raisonnement ou sélectionné et paramétré (les paramètres qualifiant

#### 4. Approches hybrides

le comportement) ou encore simplement activé, le comportement se sélectionnant en fonction d'un seuil d'activation.

- Enfin, par rapport à la notion même de comportement, il s'agit de reconsidérer les aspects de causalité et de finalité liées à l'action; ceci devrait se traduire d'une part par le relâchement de l'hypothèse d'action déterministe du paradigme cognitiviste et, d'autre part, par l'élargissement de la notion de situation mise en valeur par le paradigme comportementaliste (il s'agit de passer d'une action *située* à une action *contextuelle*).

De façon plus générale, des questions fondamentales doivent être reconsidérées sous la nouvelle optique d'intégration. Par exemple: la connaissance est-elle innée et/ou acquise? Dans le cas de connaissance acquise, par quels mécanismes un système artificiel peut-il l'acquérir? Est-elle de nature quantitative et/ou qualitative, centralisée et/ou distribuée, figée et/ou évolutive? Toute réponse à ces questions influence le choix des représentations attribuées à un système hybride dans le cadre de l'IA.

Suite à l'énumération des défis introduits par l'approche hybride, il semble naturel de dire que cette nouvelle problématique s'approche d'une problématique générale de conception d'agents autonomes. En comparaison, les paradigmes cognitiviste et comportementaliste semblent ne traiter que partiellement le problème de l'autonomie.

Enfin, disons que les éléments de cette nouvelle problématique sont abordés très inégalement dans la littérature de l'approche hybride. En particulier, les problèmes de représentation sont souvent escamotés. Les systèmes utilisent généralement des représentations symboliques classiques (innées et objectivistes) héritées du paradigme cognitiviste.

### 4.3 Solutions proposées

La thèse de l'intégration affecte aussi bien le choix de l'architecture que celui de la représentation dans le processus de conception d'un agent artificiel.

D'un point de vue architectural, deux lignes directrices apparaissent:

- a) Intégrer en un seul système une couche comportementale (située) et une couche cognitive (symbolique). Cette solution est caractéristique de l'approche hybride [Firby87, Arkin90, Mitchell90]. Elle s'inscrit dans la continuité de l'approche *top-down* du paradigme cognitiviste.

Les deux couches restent classiques. La couche cognitive s'occupe de gérer un modèle du monde et décide des comportements à entreprendre dans une problématique de coordination (souvent proche de la génération de plans d'actions), alors que les comportements traitent de façon réactive les événements survenant dans l'environnement en cours d'exécution.

Il est important de noter que, bien que la problématique soit différente, les systèmes hybrides de ce type tendent à conserver les fondements de l'approche cognitiviste; ils conservent implicitement l'hypothèse symbolique et la métaphore computationnelle qui en découle.

Dans ce cadre, la difficulté réside dans la mise au point d'une interface permettant une correspondance entre les représentations symboliques utilisées au niveau cognitif et les actions situées du niveau comportemental.

- b) Engendrer les mécanismes de raisonnement à partir de l'activité. Cette solution s'inscrit dans la continuité de l'approche *bottom-up* du paradigme comportementaliste. Le raisonnement et la représentation sont ici ancrés sur l'action.

Cette différenciation des approches possibles peut paraître factice sous un point de vue architectural; dans les deux cas, un ensemble de mécanismes de raisonnement contrôlent l'activité

située d'un système. Par contre les différences apparaissent clairement au niveau représentationnel:

- L'approche *top-down* à l'intégration tend à considérer une connaissance symbolique donnée a priori par le concepteur (innée), miroir du monde extérieur (objectiviste) et généralement figée.
- Par contre, l'approche *bottom-up* à l'intégration tend à considérer une connaissance (symbolique ou sub-symbolique) construite par le système à travers ses expériences (acquise), interprétée par le système lui-même (subjectiviste) et continuellement remise en question (évolutive).

D'un point de vue pratique, l'extension de l'approche *top-down* semble plus immédiate que celle de l'approche *bottom-up* dans la problématique d'intégration. Ceci explique certainement le déséquilibre quantitatif entre les travaux de ces deux tendances.

Nous allons examiner trois travaux que nous considérons appartenir à cette nouvelle approche hybride. Ils représentent trois approches à l'intégration; les deux premières sont des extensions de travaux cognitiviste et comportementaliste et s'inscrivent donc dans la continuité des mouvements internes à l'IA. Le troisième travail s'inspire de la psychologie cognitive (concrètement, les travaux de Piaget sur le développement cognitif de l'enfant). Ce troisième travail nous sert à illustrer la contribution à l'étude de l'autonomie de la part de démarches d'interprétation computationnelle de théories externes à l'IA.

#### 4.4 L'approche *top-down* de Ron Arkin

Ron Arkin s'intéresse au problème de la navigation réactive. Nous situons l'architecture qu'il propose comme étant une solution hybride au problème du contrôle d'un agent autonome mais qui néanmoins se trouve fortement inspirée du mouvement cognitiviste.

##### L'architecture

L'architecture AURA (pour *Autonomous Robot Architecture*) est composée d'une couche comportementale (réactive) surmontée d'une couche cognitive (délibérative).

La couche comportementale est composée de routines d'action et de perception permettant des traitements situés de l'activité. Les premières correspondent à ce qu'il appelle des "stratégies moteur" permettant de bouger suivant une orientation donnée ou de façon aléatoire, de suivre des corridors ou de s'arrimer à un obstacle (*docking*). De façon générale ces stratégies sont des comportements paramétrables (orientation et contraintes diverses) qui offrent par conséquent une interface particulière à la couche de contrôle. Quant aux routines de perception, elles sont responsables d'extraire les informations ou caractéristiques judicieuses de l'environnement pour une tâche donnée. Ce sont donc des "stratégies de perception" spécialisées.

La couche cognitive est typique du courant cognitiviste. Elle est composée de tous les modules de l'architecture fonctionnelle: perception, modélisation, planification et action. Le module de perception s'occupe d'intégrer les données provenant de l'ensemble des routines perceptives. Le module de modélisation gère une représentation de l'environnement (cartographie). Le module de planification est constitué d'un générateur de plans d'actions hiérarchique permettant d'extraire des plans globaux pour des missions de navigation qui ensuite sont raffinés par le module d'action. Ce dernier commande les routines d'action en fonction des éléments du plan. Un module supplémentaire s'occupe de contraindre les modules de planification et d'action en fonction de l'état de certaines variables internes au système.

La nature hybride de l'architecture apparaît clairement, son origine cognitiviste également. Suivant la problématique de l'approche hybride, il reste à trouver une représentation permettant d'intégrer les deux niveaux.

#### 4. Approches hybrides

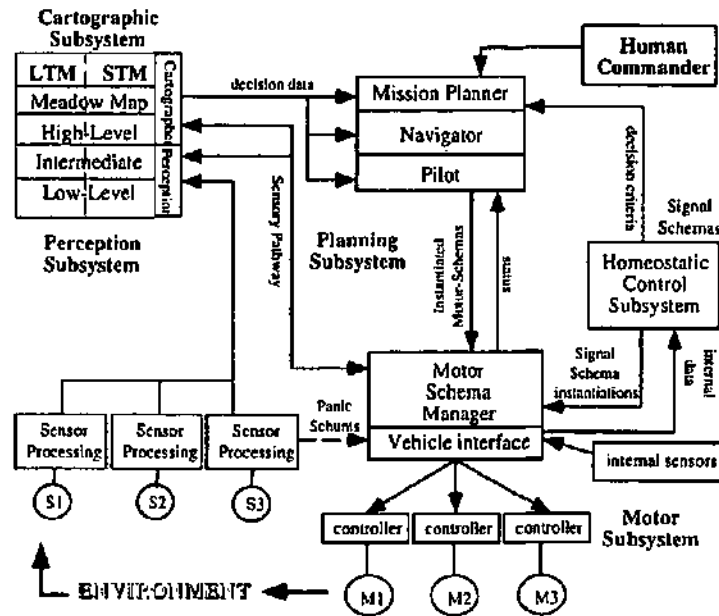


Figure 4.1 : Architecture AURA. (tiré de [Arkin90])

### La représentation

Arkin, dans le cadre de la navigation réactive d'un robot mobile, propose la technique des champs potentiels aussi bien comme représentation de l'interaction de l'agent avec son environnement (vecteurs de mouvement en direction et norme) que comme mécanisme de coordination de comportements (somme vectorielle pondérée).

Comme cela est souvent le cas dans les travaux cognitivistes, la connaissance est séparée en deux catégories:

- Une connaissance persistante, donnée a priori au système, qui offre un modèle du monde, une représentation des objets et des propriétés de l'environnement et du robot. Cette connaissance est logée dans une mémoire à long terme. Elle sert à construire les plans d'actions étant donnée une connaissance de la situation du robot dans l'espace et d'un but fourni par le concepteur.
- Une connaissance éphémère, extraite par l'agent des informations provenant des routines d'action et de perception. Cette connaissance est stockée dans une mémoire à court terme. Elle n'est utilisée que pour sortir l'agent de situations imprévues dans lesquelles le modèle du monde ne permet pas d'établir une cohérence avec la situation observée.

### Commentaires

Cette architecture hybride correspond à une extension de l'architecture fonctionnelle proposée par le mouvement cognitiviste. L'extension se fait vers l'action située à travers des routines de contrôle des capteurs et des effecteurs.

En ce sens, le contrôle correspond à une planification *off-line* classique dont le résultat (un chemin donné sous la forme de tronçons à suivre) est traité de façon plus flexible par le module d'action qui contrôle les routines suivant les indications grossières du plan global.

Nous avons vu à travers le travail de David Payton (paragraphe 3.6.2) que le choix d'une représentation sous la forme de champs potentiels est une solution possible au problème de

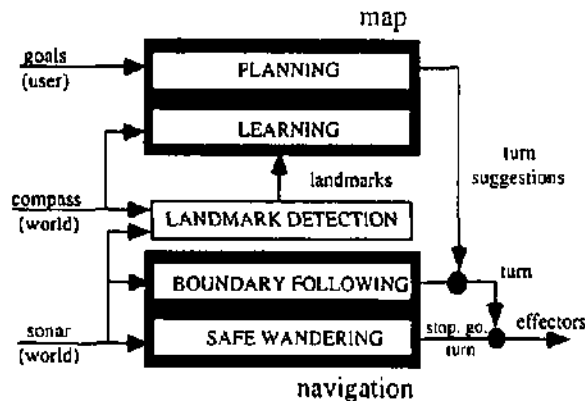


Figure 4.2 : Architecture du système de Maja Mataric. (repris de [Mataric91a])

l'intégration comportementale. Elle se trouve être particulièrement bien adaptée à des tâches de navigation en robotique mobile où l'on peut généralement se limiter à une représentation 2D de l'espace. Arkin considère même un traitement 3D de cet espace en représentant les obstacles par des sphères. Pour des tâches plus complètes que celles de navigation (distribution de courrier, rangement de chaises, interventions en milieu dangereux, labourage de champs) ce type de représentation n'est certainement pas suffisant.

De plus, la planification ne se base que sur une connaissance donnée au robot et représentant le monde extérieur. La connaissance provenant des routines ne sert que localement et dans des situations pathologiques et extrêmes. Il est regrettable qu'une compilation (intégration) de ces connaissances acquises ne soit pas envisagée; en effet, la connaissance à long terme ne s'enrichit pas des observations faites par l'agent. D'autres auteurs (voir [Russel89, Chaib-draa-Paquet93]) ont abordé cette problématique d'adaptation des connaissances stables d'un agent à travers une compilation des informations acquises par le système.

## 4.5 L'approche *bottom-up* de Maja Mataric

L'intérêt de Maja Mataric porte sur l'étude de sociétés hétérogènes d'agents. Elle a néanmoins proposé, dans une première phase de son travail, une approche originale au problème du choix de représentations adaptées aux agents situés, en poursuivant l'approche *bottom-up* du paradigme comportementaliste.

### L'architecture

Maja Mataric fait partie du laboratoire d'IA dirigé par Rodney Brooks au MIT. Son domaine d'application est également celui de la robotique mobile et l'architecture de contrôle utilisée [Mataric91a] est, bien entendu, la *subsumption architecture* (voir paragraphe 3.5.1).

Dans ce cadre, elle superpose des "niveaux de compétences"<sup>2</sup> (que nous dirions cognitifs) à un ensemble de "niveaux de compétences" comportementaux. Son appartenance au laboratoire qui peut être considéré comme le fief du comportementalisme semble être la seule explication au fait qu'elle ne se reconnaisse pas dans l'approche hybride d'un point de vue architectural. La figure 4.2 représente cette architecture.

Les modules comportementaux (*safe wandering*, *boundary following*) peuvent être assimilés à des réflexes permettant une navigation par évitement et suivi d'obstacles détectés.

<sup>2</sup>Nous conservons le vocabulaire utilisé par Brooks.

#### 4. Approches hybrides

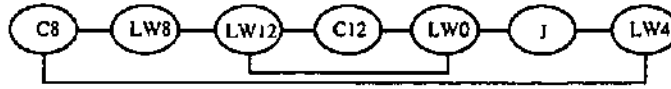


Figure 4.3 : Exemple de carte construite par le système. LW8 = *left wall heading South*, C0 = *corridor heading North*, J = *long irregular boundary*.

Un module intermédiaire et indépendant (*landmark detection*) s'occupe de détecter des caractéristiques régulières de l'environnement (obstacle à gauche, obstacle à droite ou des deux côtés). Ces caractéristiques sont transmises au module d'apprentissage. Remarquons que les caractéristiques observées sont régulières par effet de bord du comportement sous-jacent de suivi d'obstacles, qui tend à conserver les caractéristiques observées (obstacles à suivre).

En citant Mataric, le module d'apprentissage "construit et met à jour une carte topologique de l'environnement". Enfin, le module de planification peut intervenir sur le contrôle en envoyant des commandes de rotation au système en fonction des buts introduits par l'utilisateur. Ce module est prioritaire par rapport au module de suivi d'obstacles<sup>3</sup>.

#### La représentation

L'originalité du travail de Mataric porte sur son approche de la représentation. Le travail décrit dans son article [Mataric91b] s'inspire d'observations neuro-biologiques portant sur le rat.

Une carte topologique de l'environnement est construite par le module d'apprentissage en fonction des caractéristiques successivement observées [Mataric90].

Cependant, cette carte n'est pas de nature symbolique; chaque nouvelle caractéristique observée conduit à la création d'un processus interne correspondant à cette caractéristique. Ainsi, la carte topologique de l'environnement est un réseau de processus. Chaque processus est formé d'un ensemble de règles et spécifié par son type (caractéristique représentée de l'environnement<sup>4</sup>), l'orientation globale du robot lors de l'observation de la caractéristique (cette information provient directement de la boussole) et sa position topologique (le processus connaît ses processus voisins).

Les liens entre processus représentent une contiguïté spatiale entre caractéristiques observables du monde physique. Ces connexions sont des canaux de communication par lesquels les processus peuvent s'influencer. Le module de planification exploite cette architecture distribuée en injectant une activité aux processus correspondant aux buts. Les processus propagent l'activité reçue sur tous leurs voisins. Ainsi, de proche en proche, l'activation est diffusée à travers tout le réseau. Le gradient d'activation résultant de cette propagation est ensuite utilisé pour déterminer les suggestions d'orientation faites par le module de planification au contrôle des moteurs.

Maja Mataric appelle ce type de représentation des "représentations actives". Elle considère qu'il s'agit d'une représentation non symbolique (ensemble de processus connectés<sup>5</sup>) et distribuée (les processus se reconnaissent ou non dans la caractéristique proposée par le détecteur de caractéristiques et ils propagent localement leur activation).

<sup>3</sup>Si l'approche est hybride en soi, le raisonnement apparaît comme une activité située supplémentaire; d'un point de vue architectural, les niveaux de raisonnement sont de même nature que ceux portant l'activité. La planification devient donc un comportement permettant de contrôler les rotations de l'agent en fonction de la connaissance et des buts courants. Le contrôle de l'activité, sous la forme d'une orientation comportementale, se réduit à une consigne de rotation.

<sup>4</sup>Combinaisons de "mur à gauche", "mur à droite". La présence des deux donne la caractéristique "corridor".

<sup>5</sup>Nous aurions tendance à considérer qu'il s'agit néanmoins d'une représentation symbolique, vu la nature des informations utilisées pour spécifier chacun des processus.

Mataric lance également le débat de la nature des connaissances utiles à un agent autonome: qualitatives ou quantitatives. S'inspirant d'expériences faites sur le rat, elle suppose l'utilisation à la fois d'informations topologiques et métriques dans les tâches de navigation du rat dans un environnement connu (un labyrinthe). Elle relève ensuite l'importance de la tâche du système dans la nature des représentations utilisées. Son application exploite exclusivement la nature topologique de la représentation et limite l'information métrique à une annotation des processus par l'orientation absolue du système au moment de l'observation.

## Commentaires

Par cette représentation originale, Mataric permet d'intégrer de nouvelles capacités à des agents situés. A notre sens, ces capacités sont d'ordre cognitif. Nous considérons qu'il s'agit d'un enrichissement qualitatif des agents classiques de Brooks (et des agents du paradigme comportementaliste en général) rendu possible par l'approche hybride abordée à travers une méthodologie *bottom-up*.

De plus, les fonctions cognitives proposées (apprentissage et planification) sont indépendantes du contenu représentationnel, ce qui en fait un modèle cognitif général permettant d'envisager des applications différentes de celle de la navigation d'un robot mobile.

Enfin, la complexité des traitements nécessaires à l'apprentissage et à la planification sont, au pire, linéaires avec la taille de la représentation. Le caractère réactif de l'agent comportemental est donc conservé.

En comparaison avec l'architecture AURA de Arkin, nous constatons que le poids est ici mis sur l'aspect comportemental. A la limite, le raisonnement n'est supporté que par un abcès, une excroissance "vers le haut" ayant encore la forme d'un comportement.

En marge de ces propriétés intéressantes, nous constatons que l'architecture exploitée (la *subsumption*) n'a pas évolué malgré cette nouvelle réflexion représentationnelle. Elle conserve donc les limitations que nous avons mentionnées au paragraphe 3.5.1 (calibrage délicat des circuits arbitres, faible capacité d'extension à plus de niveaux de compétences, difficulté de contrôler des compétences variées qui permettrait de rendre l'agent plus polyvalent).

Il est regrettable également que le système décrit soit mono-comportemental; le système ne possède en effet qu'une seule tendance (suivre les obstacles observés). Il est difficile d'envisager une coordination multi-comportementale uniquement par un contrôle en rotation, tel que celui proposé.

Ne possédant aucune description du mécanisme d'apprentissage (connexions entre les processus constituant la carte topologique), il nous est difficile de juger de la faisabilité d'une telle approche. Néanmoins, la construction des cartes données en exemple semble faire intervenir un jugement du concepteur car, à plusieurs reprises, l'auteur dit que "la topologie de la carte est maintenue isomorphe à celle de l'espace physique exploré". Or le problème du maintien de l'isomorphisme est en soi non-décidable; on ne peut pas construire un tel graphe de façon synchronique à partir d'une succession d'observations car, en observant un état déjà rencontré, le système ne sait pas s'il correspond à l'élément topologique connu de la carte ou à un nouvel élément. Dans ce cas, tout choix introduit une hypothèse qui peut par la suite être contredite. Du fait de l'imbrication successive des hypothèses, la mise à jour du graphe lors de l'observation d'une contradiction est impossible; en effet, on ne sait pas quelle hypothèse est à mettre en cause.

La capacité de localisation semble également être naturelle dans ce système. Or, dès qu'il existe deux processus dans la carte possédant le même type<sup>6</sup>, l'observation de ce type conduit à une localisation ambiguë; laquelle des deux localisations possibles, parmi les états connus, est la bonne? Mataric semble être consciente du problème. Pourtant la notion de contexte reste non définie et par conséquent ambiguë.

---

<sup>6</sup>Remarquons que ce cas n'est pas mentionné dans les exemples traités.

#### 4. Approches hybrides

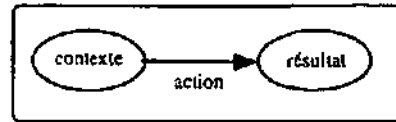


Figure 4.4 : Le modèle de schème chez Drescher.

Enfin, la technique de propagation de gradient semble considérer des connexions bidirectionnelles entre processus. Ceci tend à dire que le sens d'expérimentation est négligé dans la phase de planification. Dans ce cas, il faut que l'agent connaisse une action inverse pour chaque action possible, ce qui ne semble pas être le cas<sup>7</sup>. En outre, en utilisant des arcs non orientés, le type de propagation suggéré peut conduire à l'apparition de maxima locaux qui emprisonnent l'agent et empêchent sa convergence vers le but qui est la source d'activation.

### 4.6 Les schèmes de Piaget repris par Drescher

D'autres travaux ont récemment adopté une approche constructiviste liée à la connaissance et ont proposé des techniques de construction de cartes topologiques. Parmi eux, Gary Drescher [Drescher91] s'est proposé d'expérimenter la théorie du schème énoncée par Jean Piaget pour expliquer le développement cognitif de l'enfant<sup>8</sup>.

Drescher focalise son attention au niveau cognitif sans chercher à intégrer son modèle dans un système réel. Il n'est donc pas à proprement parler partisan de l'approche hybride. Il développe néanmoins la fonction d'apprentissage et son travail pourrait être appliqué dans une approche *bottom-up* telle que celle de Maja Mataric.

#### Les schèmes et leur construction

Drescher propose une simulation comme environnement d'expérimentation, intégrant dans une grille 2D des objets, une main et un oeil permettant de percevoir l'environnement à travers un champ de vision limité et mobile dans lequel peuvent apparaître des parties du corps. Le système peut déplacer la main ou le champ de vision. Il peut également ouvrir ou fermer la main pour saisir des objets. Différentes modalités sensorielles sont simulées (proprioception, tact, odorat) et reconnaissables par le système. L'objectif est de construire des schèmes à partir de régularités observées lors d'expériences vécues.

Dans le système de Drescher, un schème est formé d'un contexte, d'une action et d'un résultat. Le *contexte* et le *résultat* sont des formules propositionnelles décrivant un état du monde. Ainsi, chaque schème déclare (avec une certaine probabilité) qu'une action particulière, réalisée dans un contexte particulier, provoque un résultat particulier. Cette représentation rappelle la sémantique liée au formalisme STRIPS. La différence essentielle est que les liaisons causales sont ici extraites de l'expérience.

Pour qu'un schème soit exécuté (que son action soit réalisable), il faut que le contexte qui lui est associé apparaisse dans l'état courant du monde. Une hypothèse forte de ce travail consiste à considérer des actions déterministes (même effet à partir du même contexte) et des sensations non bruitées (l'état du monde simulé est parfaitement perçu par l'agent). Les seuls

<sup>7</sup>Dans ce cas, cela correspondrait à des inversions d'orientations.

<sup>8</sup>Pour Piaget, un schème est la correspondance cognitive du comportement. L'idée est que les premières actions (réflexes) de l'enfant se coordonnent progressivement en des schèmes sensori-moteurs qui sont ensuite ré-utilisés dans les mêmes contextes, généralisés à des contextes plus larges et structurés en des sortes de méta-schèmes. La notion de schème correspond à une abstraction psychologique. Son existence est inférée de l'observation des comportements.

imprévus possibles sont liés au mouvement spontané des objets du monde. Dans ces conditions, l'extraction de régularités pour la construction de nouveaux schèmes est considérablement facilitée.

Drescher propose un mécanisme d'induction, qu'il appelle "*marginal attribution*", pour la construction de nouveaux schèmes par le système, en fonction de ses expériences. Ainsi, un ensemble de schèmes représente implicitement un ensemble de cartes cognitives possibles. Les schèmes peuvent être enchaînés pour former des méta-schèmes (parties explicites de la carte cognitive). Les schèmes acquis sont ensuite utilisés pour choisir les actions du système en fonction de buts donnés.

## Commentaires

Drescher étudie des fonctions intéressantes telles que l'apprentissage empirique de nouveaux concepts, le concept d'objet persistant (qui continue à exister même s'il disparaît du champ visuel), ou l'extraction de correspondances entre sensations de modalités différentes.

Or, si le travail d'actualisation des théories de Piaget dans le cadre de l'IA fait par Drescher est intéressant, sa façon de l'expérimenter nous interpelle. A notre sens, le cadre expérimental introduit des hypothèses aussi fortes que celles du paradigme cognitiviste; les objets du monde sont perçus de façon objectiviste, tous les éléments d'interface (perception et action) contrôlables par le système sont déterministes, aucun bruit n'est considéré.

De plus, malgré ces hypothèses simplificatrices, le mécanisme d'apprentissage semble hériter la complexité des raisonnements symboliques classiques. La réactivité nécessaire au raisonnement d'un système hybride n'est pas obtenue.

Enfin, la notion de contexte est ponctuelle dans le temps. Elle correspond à un état instantané du monde observé; ce traitement de la notion de contexte est, à notre sens, trop restreint pour pouvoir éviter des problèmes d'ambiguïté dans un environnement tant soit peu varié. Nous y reviendrons au chapitre 8.

## 4.7 Conclusion

Nous constatons que l'approche hybride est encore fortement influencée par les paradigmes opposés dont elle provient: le cognitivisme et le comportementalisme. Les deux méthodologies (*top-down* et *bottom-up*) différenciant les paradigmes d'origine sont à nouveau exploités et amplifiés dans une perspective d'intégration du raisonnement et de l'action. Cependant, les systèmes tendent à rester classiques dans leur contenu et dans leurs fonctions.

Pourtant, la problématique introduite par l'approche hybride va à l'encontre de certains fondements des deux courants d'origine. En particulier, l'intégration raisonnement-action prend le contre-pied de l'hypothèse symbolique et de la métaphore computationnelle; le raisonnement ne peut plus négliger la nature de l'action qui le sous-tend et l'action doit fournir les mécanismes de contrôle adéquats au type de raisonnement réalisé.

Cette empreinte encore bien marquée de l'approche hybride est certainement due à sa jeunesse. Le temps devrait permettre de s'en détacher pour proposer des solutions plus adéquates.

Ainsi, si la problématique introduite est différente, la conception de systèmes hybrides semble plus motivée par des intérêts pratiques que par une réflexion théorique. Or, une réflexion fondamentale portant sur la connaissance et l'interaction sujet-milieu est primordiale.

Ces quelques commentaires nous font constater l'envergure des travaux devant encore être réalisés pour couvrir l'ensemble de la problématique introduite. Si des techniques plus réactives de raisonnement sont proposées et l'hypothèse de l'action déterministe est généralement levée, le type de contribution du comportement à la capacité de raisonnement et au contenu représentationnel reste un problème ouvert.

D'un point de vue architectural, ceci passe par la proposition de nouvelles architectures qui peuvent, dans un premier temps, être des évolutions d'architectures connues offrant des

#### 4. *Approches hybrides*

mécanismes de contrôle qui facilitent et généralisent l'intégration du raisonnement et de l'action.

D'un point de vue représentationnel, il est temps de prendre du recul par rapport aux travaux classiques. Dans ce sens, le jeune domaine de la vie artificielle, par sa nature interdisciplinaire et plus particulièrement son inspiration biologique et psychologique, devrait apporter de nouvelles sources d'inspiration en reconsidérant la nature de la connaissance liée à un sujet et l'importance de l'interaction sujet-milieu. Ce chapitre a permis de voir l'effet novateur de justifications neuro-biologiques a posteriori (Maja Mataric) ou d'inspiration psychologiques a priori (Gary Drescher).



## **Partie II**

# **Un modèle d'agent autonome**

“Les théories que nous possédons sont loin de représenter des vérités immuables. Quand nous faisons une théorie générale dans nos sciences, la seule chose dont nous soyons certains, c’est que toutes ces théories sont fausses absolument parlant. Elles ne sont que des vérités partielles et provisoires qui nous sont nécessaires, comme des degrés sur lesquels nous reposons, pour avancer dans l’investigation; elles ne représentent que l’état actuel de nos connaissances et, par conséquent, elles devront se modifier avec l’accroissement de la science, et d’autant plus que les sciences sont moins avancées dans leur évolution.”

*Claude Bernard,*  
*Introduction à l’étude de la médecine expérimentale, 1865.*

“Man knows and his capacity to know depends on his biological integrity; furthermore, he knows that he knows. As a basic psychological and, hence, biological function cognition guides his handling of the universe and knowledge gives certainty to his acts; objective knowledge seems possible and through objective knowledge the universe appears systematic and predictable. Yet knowledge as an experience is something personal and private that cannot be transferred, and that which one believes to be transferable, objective knowledge, must always be created by the listener: the listener understands, and objective knowledge appears transferred, only if he is prepared to understand. Thus cognition as a biological function is such that the answer to the question, “What is cognition?” must arise from understanding knowledge and the knower through the latter’s capacity to know.

Such is my endeavor.”

*Humberto R. Maturana,*  
*Biology of cognition, 1970.*

Caminante, son tus huellas  
el camino, y nada más;  
caminante, no hay camino,  
se hace camino al andar.

Al andar se hace camino,  
y al volver la vista atrás  
se ve la senda que nunca  
se ha de volver a pisar.

Caminante, no hay camino,  
sino estelas en la mar.

*Antonio Machado*

## Introduction

L'autonomie est un sujet d'étude à la fois ambitieux et extrêmement attrayant pour différentes disciplines des sciences cognitives.

Parmi les approches marquantes de l'autonomie, la théorie de Maturana et Varela, basée sur les thèses de l'autopoïèse et de la clôture opérationnelle, aspire à résumer les caractéristiques fondamentales de la vie et de sa classe englobante: l'autonomie. Malheureusement, ce modèle d'une extrême concision, enfanté par la biologie et élargi aux sciences cognitives, est difficile à appréhender sous un point de vue computationnel, tellement ses imbrications conceptuelles sont nombreuses. Il porte en lui des concepts difficiles à cerner tels que l'identité ou l'émergence. Plusieurs auteurs sont récemment venus alimenter cette voie encore jeune mais fertile et prometteuse [Bourgine-Varela91, Bersini92, Deffuant92].

Notre travail, né de la volonté d'intégrer la nature délibérative du raisonnement et la nature réactive de l'action, façonné dans le cadre de l'IA, n'a pas eu l'occasion de s'en inspirer. Cette théorie lui est apparue progressivement, au fur et à mesure qu'il s'en approchait. Il partage avec elle l'ambition d'étudier et comprendre le phénomène d'autonomie. Enfin, nous pensons qu'il contribue modestement à en explorer certaines facettes essentielles.

Cette seconde partie présente notre contribution à la modélisation et conception d'un agent autonome. Elle est basée sur notre tentative de caractérisation de la notion d'autonomie faite en introduction, à travers les *critères d'évaluation*<sup>9</sup> (point de vue externe) et la notion de *fonctionnalisation* de l'activité<sup>10</sup> (point de vue interne).

Loin de prétendre apporter une explication complète à l'autonomie, nous espérons extraire certains éléments menant à une compréhension partielle de ce phénomène complexe, central dans la problématique scientifique actuelle, étudié sous des optiques très variées mais encore très peu compris. Notre objectif est de saisir certaines facettes de l'autonomie à travers la réflexion (modélisation) et l'application (robotique mobile).

Notre contribution se veut double:

- En *conception*, nous proposons l'architecture ARCO comme solution simple et générale au problème de la sélection d'actions.

Cette architecture se caractérise par son aspect intégrateur (corps, action et raisonnement) et englobant (de la perception à l'action et de la sensation à la représentation symbolique structurée). Cette conception large de l'agent autonome s'accompagne nécessairement de certaines simplifications que nous avons tenté de limiter. Ceci a permis de produire un modèle et une plate-forme prototype, présentant de bonnes perspectives d'amplification.

- En *représentation*, nous adoptons une méthodologie constructiviste sous une optique non-objectiviste.

Cette approche consciente et explicite nous fait insister sur l'importance de l'interaction de l'agent avec son milieu dans le processus ontogénétique de structuration des connaissances. De plus, par opposition aux travaux de l'approche cognitiviste, l'agent devient l'auteur de cette connaissance. Ceci a permis de proposer une représentation symbolique, ancrée sur l'expérience sensori-motrice et interprétée, structurée et exploitée par trois processus cognitifs.

De façon secondaire, notre travail espère contribuer à l'établissement d'une base méthodologique et pratique, favorisant le rapprochement pluridisciplinaire et la collaboration interdisciplinaire. Il est en effet essentiel, pour que différentes disciplines puissent s'inspirer mutuellement,

<sup>9</sup> Rappelons que les critères d'évaluation considérés sont la *survie* (capacité de préserver son intégrité physique et énergétique), le *rôle social* (capacité de satisfaire les tâches qui lui sont attribuées) et l'*évolution* (capacité de s'améliorer au cours du temps).

<sup>10</sup> *Fonctionnalisation*: Exploitation contextuelle et systématique des propriétés d'action par rapport aux critères d'évaluation.

qu'elles exposent leur méthodologie et qu'elles proposent des modèles pouvant être interprétés et partagés.

Cette seconde partie du mémoire comporte six chapitres.

Le premier introduit ARCO, l'architecture d'agent autonome que nous proposons. Les quatre chapitres suivants décrivent le modèle en parcourant les trois niveaux d'abstraction de l'architecture dans l'ordre dans lequel ils ont été modélisés (physique, comportemental puis cognitif).

Le chapitre 6 parcourt le niveau physique et sert essentiellement à illustrer un type d'agent à travers la description de notre cadre expérimental. Le chapitre 7 caractérise la nature des comportements considérés dans notre modèle et introduit un formalisme de description d'un agent comportemental. Notre contribution sur le plan représentationnel est développée au chapitre 8, lors de la présentation du niveau cognitif. Enfin, les processus cognitifs (interprétation, apprentissage, motivation) et la capacité de fonctionnalisation qui en découle sont spécifiés au chapitre 9.

De plus, chaque niveau d'abstraction est illustré dans le cadre d'une application à la navigation d'un robot mobile. L'exemple illustratif se veut simple, pour faciliter la compréhension du modèle tout au long de l'exposé.

De même, à travers cette deuxième partie, des éléments d'expériences réalisées dans notre laboratoire sont introduits ponctuellement, pour permettre d'évaluer la faisabilité de l'approche et d'appuyer les choix méthodologiques réalisés.

Le chapitre 10 décrit l'environnement d'expérimentation que nous avons développé et fera le bilan de l'application de notre modèle à la robotique mobile.

Finalement, il est important de rappeler que nous utilisons le terme "agent" dans le sens élémentaire et général de "système artificiel ayant des capacités de perception et d'action", un robot mobile en particulier<sup>11</sup>. Ainsi, malgré certaines digressions liées à la source d'inspiration qu'est le monde vivant, l'autonomie est ici abordée dans le cadre de l'IA, par opposition à ce que pourrait être une approche biologique ou éthologique.

---

<sup>11</sup> [Antoine-al.92], entre autres, considère une définition proche à celle-ci, bien que plus détaillée.

## *Modélisation d'un agent autonome*

# ARCO: une architecture d'agent autonome

ARCO (acronyme pour **A**rchitecture **R**éactive et **C**ognitive) est l'architecture globale d'agent autonome que nous proposons et qui a été étudiée dans le cadre de cette thèse.

Le rôle d'un modèle de système complexe est d'abstraire de la globalité les caractéristiques pertinentes à la compréhension et, si possible, à la reconstitution d'un tel système<sup>1</sup>. C'est là également l'objectif de l'architecture que nous proposons.

## 5.1 Les trois niveaux d'abstraction

L'architecture ARCO est décomposée conceptuellement en trois niveaux d'abstraction: le niveau physique (0), le niveau comportemental (1) et le niveau cognitif (2). La figure 5.1 représente les composants d'ARCO.

Le niveau 0 contient l'agent physique, composé de ses capteurs et de ses effecteurs. C'est lui qui établit le contact avec l'environnement.

Le niveau 1 est constitué des processus génératifs des comportements de l'agent. Il introduit la capacité d'activité et fait de l'agent physique un agent situé.

Enfin, le niveau 2 est composé de la connaissance et des processus cognitifs qui structurent cette connaissance. Il introduit la capacité de fonctionnalisation et fait de l'agent un agent cognitif, susceptible de satisfaire les critères d'évaluation.

Chaque niveau d'abstraction fournit des informations au niveau immédiatement supérieur. A l'inverse, chaque niveau contrôle le niveau immédiatement inférieur.

Ainsi, la liaison \* transmet l'état des capteurs (signaux) aux comportements. Ces derniers traitent les signaux reçus et génèrent des commandes qui, envoyées par la liaison #, permettent

<sup>1</sup>La linguistique, par exemple, modélise le système complexe qu'est la langue naturelle à travers les niveaux phonétique, syntaxique, sémantique et pragmatique.

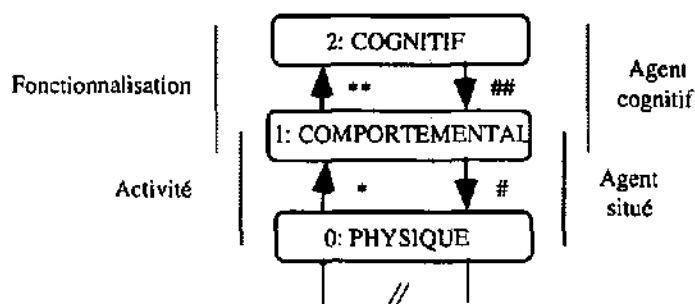


Figure 5.1 : L'architecture globale d'agent autonome, ARCO.

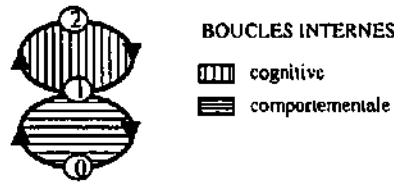


Figure 5.2 : Boucles internes d'interaction dans ARCO.

aux comportements de contrôler directement les effecteurs.

De même, la liaison \*\* transmet l'état des comportements (état de stimulation) au niveau cognitif qui, par la liaison ##, sélectionne l'attitude comportementale qui lui semble adéquate dans sa tâche de fonctionnalisation. Ainsi, seules les commandes du comportement sélectionné parviennent aux effecteurs.

## 5.2 Des dynamiques emboîtées

La dynamique globale de l'architecture ARCO est basée sur différentes boucles d'interactions: nous distinguons deux boucles internes et trois boucles externes<sup>2</sup>.

Les boucles internes sont caractérisées par l'interaction d'éléments internes à l'agent. Elles sont portées par les deux interfaces entre les niveaux d'abstraction.

- La première boucle interne est issue de l'interaction continue entre le niveau physique (0) et le niveau comportemental (1): c'est la *boucle comportementale*. Elle est portée par les canaux internes \* et # de l'architecture.
- La seconde est issue de l'interaction continue entre le niveau comportemental (1) et le niveau cognitif (2): c'est la *boucle cognitive*. Elle est portée par les canaux internes \*\* et ## de l'architecture.

La figure 5.2 représente ces deux boucles internes. Les trois niveaux d'abstraction sont représentés par les cercles numérotés 0, 1 et 2.

Les boucles externes sont caractérisées par l'interaction d'éléments internes à l'agent avec l'environnement. On dit que ces boucles "passent à travers l'environnement".

- La première boucle externe est réalisée par l'interaction entre le niveau physique et l'environnement à travers les capteurs et les effecteurs: c'est la *boucle de dialogue*.
- La seconde met en interaction le niveau comportemental avec l'environnement: c'est la *boucle d'activité*. Cette boucle bénéficie des propriétés de la boucle comportementale (interne) et de la boucle de dialogue (externe) sur lesquelles elle s'appuie.
- Enfin, la troisième boucle externe met en interaction le niveau cognitif avec l'environnement: c'est la *boucle de fonctionnalisation*. Elle bénéficie des propriétés de la boucle cognitive (interne) et de la boucle d'activité (externe) sur lesquelles elle s'appuie.

Ces boucles externes s'emboîtent les unes sur les autres. La figure 5.3 permet de visualiser les enchevêtrements de la dynamique de l'agent. L'environnement est représenté par deux barres obliques symbolisant la brisure des boucles externes.

<sup>2</sup>Les termes "interne" et "externe" sont à mettre en liaison avec les deux points de vue que nous avons adoptés dans notre caractérisation de l'autonomie dans l'introduction générale. Les boucles internes sont celles dont l'observateur ne connaît rien et qu'il ne peut qu'imaginer. Les boucles externes sont celles qui portent les propriétés que l'observateur utilise pour juger des compétences du système.

## 5. ARCO: une architecture d'agent autonome

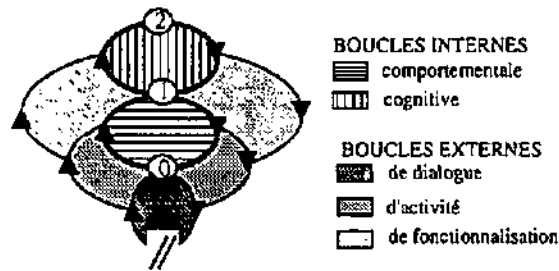


Figure 5.3 : Boucles d'interaction de l'architecture ARCO.

Intuitivement, l'emboîtement physique de ces boucles induit des dépendances logiques sur les dynamiques qu'elles portent. La description de chacun des niveaux d'abstraction permettra de préciser ces dépendances.

### 5.3 Propriétés de l'architecture

L'architecture ARCO présente des propriétés intéressantes, parmi lesquelles:

**approche synthétique:** Les capacités physiques de l'agent sont la base (contraignante) des comportements. Ces derniers sont, à leur tour, les germes de la cognition. Inversement, la cognition s'appuie uniquement sur les capacités comportementales qui s'appuient, à leur tour, uniquement sur les capacités physiques.

Ces dépendances introduisent des contraintes importantes qui, comme nous le verrons aux paragraphes 7.3.1 et 8.7, imposent des choix méthodologiques déterminants.

Cette première propriété présente ARCO comme une extension des architectures du paradigme comportementaliste. Elle a la particularité de poursuivre l'approche *bottom-up* jusqu'au niveau cognitif.

**modularité conceptuelle:** L'action et le raisonnement y sont distinctement séparés à travers les niveaux d'abstraction. Ceci a facilité la réflexion relative aux besoins de chaque niveau et à la caractérisation de leurs interactions.

**architecture hybride:** Elle intègre, de façon simple et naturelle, l'approche comportementale (réactive) et l'approche cognitive (délibérative, rationnelle) de la modélisation d'agents autonomes<sup>3</sup>.

**généralité:** Le contenu de chacun des trois niveaux d'abstraction reste évidemment ouvert. ARCO est indépendante du robot, des comportements et du modèle cognitif utilisés. Seules sont spécifiées les interfaces entre les niveaux d'abstraction et la nature des comportements (voir chapitre 7).

**plate-forme d'étude pour la "sélection d'actions":** ARCO se prête particulièrement bien à l'étude générale de ce sujet. L'interface de contrôle y est clairement spécifiée et le niveau cognitif n'impose aucun modèle cognitif particulier. Celui que nous décrivons aux chapitres 8 et 9 constitue un modèle cognitif possible.

ARCO peut donc servir à l'étude et à la comparaison de différents modèles cognitifs sur la base d'une même plate-forme comportementale.

<sup>3</sup>Voir [Malcolm-Smithers90] pour l'apologie d'une telle intégration au niveau architectural.

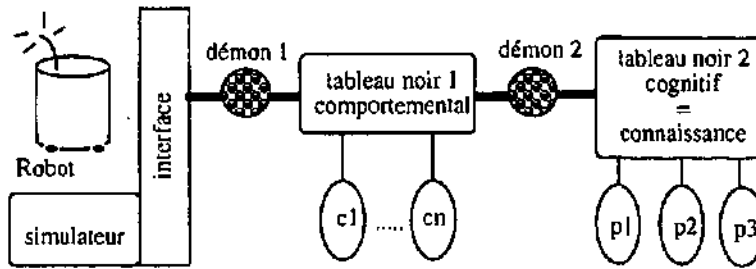


Figure 5.4 : Implantation distribuée de l'architecture ARCO.

Ces propriétés permettent de situer l'architecture ARCO par rapport à l'état de l'art exposé dans la première partie de ce mémoire.

## 5.4 Implantation distribuée

L'architecture ARCO a été étudiée dans le cadre du projet MARS<sup>4</sup> (*Mobile Autonomous Robot System*) et a fait l'objet d'une implantation sur stations de travail dans un environnement UNIX.

Chacun des trois niveaux d'abstraction est constitué d'entités concurrentes: capteurs et effecteurs pour le niveau physique (0), comportements pour le niveau comportemental (1) et processus cognitifs pour le niveau cognitif (2). Conceptuellement, ces entités doivent s'exécuter en parallèle aussi bien à l'intérieur de chaque niveau qu'entre les niveaux eux-mêmes<sup>5</sup>.

Un simulateur, accessible par *sockets* à travers une interface client, accompagne le robot mobile que nous avons utilisé dans nos applications. L'interface permet de travailler uniformément avec le simulateur ou avec le robot réel.

Les différents capteurs et effecteurs sont gérés par plusieurs cartes sur le robot. Ainsi, le niveau physique est distribué, *on-board*, sur plusieurs processeurs.

Le simulateur et les niveaux 1 et 2 de l'architecture ARCO tournent sur des stations de travail SUN, ce qui nous permet d'exploiter l'environnement UNIX.

Les deux niveaux supérieurs d'ARCO (comportemental et cognitif) sont implantés autour du mécanisme du tableau noir (*blackboard*)<sup>6</sup>; nous avons donc deux tableaux noirs que nous nommons  $T_1$  et  $T_2$  respectivement.

Les clients de  $T_1$  sont les différents comportements. Les clients de  $T_2$  sont les trois processus cognitifs.

De plus, les différents niveaux d'abstraction (interface robot, tableaux  $T_1$  et  $T_2$ ) sont reliés par deux démons qui transfèrent les informations pertinentes, dans les deux sens. Le démon  $D_1$  lie l'interface robot et le tableau  $T_1$ , alors que le démon  $D_2$  lie les deux tableaux noirs.

Le tableau  $T_1$  gère les données du niveau comportemental d'ARCO et contient les informations suivantes:

- les données provenant des différents capteurs (du niveau physique, déposées par  $D_1$  et exploitées par les comportements),

<sup>4</sup>Projet National du programme "Intelligence Artificielle et Robotique" PNR-23, requête no. 4023-027037.

<sup>5</sup>Voir [Müller-Rodríguez93] pour un développement plus détaillé que celui réalisé ici.

<sup>6</sup>Un *tableau noir* représente une zone mémoire où des clients (des processus logiques) peuvent déposer et retirer des informations. Il est divisé en plusieurs zones. Chaque client n'a accès qu'à certaines zones en lecture et/ou en écriture. Ainsi, une même zone peut servir en lecture pour certains clients et en écriture pour d'autres (éventuellement les mêmes); les clients ne connaissent ni l'origine des informations qu'ils lisent, ni la destination de celles qu'ils fournissent.

## 5. ARCO: une architecture d'agent autonome

- les informations liées aux comportements (déposées par les comportements): il s'agit essentiellement de l'état des comportements (exploitées par  $D_2$  qui les transfère à  $T_2$ ) et les commandes des comportements (exploitées par  $D_1$  qui les envoie à l'interface robot),
- l'identification du comportement sélectionné (provenant du niveau cognitif, déposée par  $D_2$  et exploitée par  $D_1$  pour savoir quelle commande de comportement envoyer aux effecteurs à travers l'interface robot).

Le tableau  $T_2$  gère les données du niveau cognitif et est constitué de la connaissance de l'agent partagée par les trois processus cognitifs. Nous en détaillerons le contenu au chapitre 8.

Ainsi, les comportements et les processus cognitifs sont des modules distribués mais interdépendants, ayant chacun un rôle spécifique dans le système global. Ils n'ont pas connaissance du reste du système et se limitent à lire les données qui leur sont accessibles et à fournir les résultats pour lesquels ils ont été programmés.

Le mécanisme de tableau noir que nous avons développé exploite la fonctionnalité de gestion de bases de données fournie par UNIX (*yellow pages*). Les démons sont des processus particuliers accédant à différents tableaux noirs.

Cette implantation offre différents avantages. Elle nous a permis:

- de concevoir et tester indépendamment chacun des clients (comportements, processus cognitifs),
- de faire collaborer différentes personnes dans la mise au point du système et des applications,
- d'utiliser des langages de programmation différents (C pour les comportements, CLOS pour le niveau cognitif),
- de distribuer les processus sur plusieurs machines (stations de travail, PCs),
  - pour s'approcher d'un traitement temps-réel (toutes les boucles implantant les comportements que nous décrirons au chapitre 7 ont un temps de cycle proche ou supérieur au hertz),
  - pour exploiter les propriétés de certaines machines dans des traitements spécifiques (essentiellement en vision, cartes spécialisées),
- de rendre le système flexible à l'ajout ou au retrait de certains processus en cours d'exécution.

### 5.5 Commentaires

En informatique, l'approche modulaire tend à diviser un problème complexe en sous-problèmes pouvant être traités et surtout implantés séparément. Elle repose sur l'idée que les connexions entre modules sont plus légères (suivant certains critères) que les connexions internes aux modules. Lorsque la décomposition satisfait ce critère, le système modulaire devient plus simple à comprendre et à implanter que le système initial.

A travers ARCO, nous offrons une décomposition modulaire en niveaux d'abstraction pour une architecture d'agent autonome; cette architecture limite les interactions entre niveaux à des mécanismes simples de communication et au transfert d'informations rudimentaires (d'un bit à quelques bytes, pas d'images vidéo par exemple).

De même, à l'intérieur de chacun des niveaux, la modularité facilite la compréhension et la mise sur pied d'un tel système; comportements indépendants et processus cognitifs collaborent à travers des tableaux noirs.

Nous avons observé qu'une telle décomposition à travers les niveaux d'abstraction induit différentes dynamiques emboîtées et interdépendantes.

### *Modélisation d'un agent autonome*

Enfin, cette même modularité a permis d'implanter ARCO sur la base du concept informatique de tableau noir, ce qui a conduit au développement d'une plate-forme prototype flexible et suffisamment performante<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup>Pour d'autres exemples d'utilisation de tableaux noirs en conception d'agents autonomes, voir [Silva-al.91, Thomas-al.93].

# Le niveau physique

## 6.1 Introduction

Le niveau physique constitue le premier niveau de l'architecture ARCO. C'est lui qui facilite l'interaction de l'agent avec son environnement à travers une boucle de dialogue portée par les capteurs et les effecteurs.

L'architecture ARCO a été expérimentée, dans un premier temps, sur un robot mobile HERO-2000 que nous avons substitué, après une première validation de l'approche, par un robot mobile Nomad-200.

Les deux robots sont équipés d'un ensemble de capteurs et d'effecteurs. Leur tourelle est indépendante de la base et peut pivoter. Enfin, ils sont dotés d'un système de communication permettant à des programmes tournant sur une station de travail de les contrôler, soit par câble, soit par radio.

Ce chapitre passe en revue les éléments du robot Nomad-200 comme exemple de niveau physique dans le cadre de l'architecture ARCO. Nous décrivons brièvement les différents capteurs, les effecteurs et le mécanisme de communication dont est doté le robot. Nous terminerons par quelques commentaires évaluant les capacités sensori-motrices d'une telle plate-forme et par un ensemble de réflexions portant sur la contribution du niveau physique à l'autonomie de l'agent.

## 6.2 Les capteurs

La biologie distingue trois catégories de capteurs, suivant l'origine des stimulations auxquelles ils sont sensibles. Certains portent des sensations pouvant être conscientes, d'autres pas. Il s'agit de

**l'extéroception:** fonction portée par les récepteurs d'informations extérieures. Elle couvre les cinq sens "usuels": la vue, l'ouïe, le toucher, le goût et l'odorat.

**la proprioception:** fonction portée par les récepteurs des sensations somatiques profondes. C'est la fonction sensorielle qui permet, par exemple, de savoir où se trouve notre main même si on ne la voit pas.

**l'intéroception:** fonction sensorielle portée par les récepteurs de stimulations internes à l'organisme. Ces capteurs sont parfois appelés viscérocepteurs car leurs stimulations proviennent essentiellement des systèmes viscéraux (intestins, coeur, poumons, sang, glandes endocrines, moelle osseuse)<sup>1</sup>.

Le robot que nous utilisons est également muni de capteurs fournissant des informations de différentes natures, suivant ces trois catégories de fonctions sensorielles. Le mieux sera de les passer en revue.

---

<sup>1</sup> Il a été démontré que les informations intéroceptives influencent le comportement à travers les émotions et certains mécanismes inconscients qu'ils contrôlent.

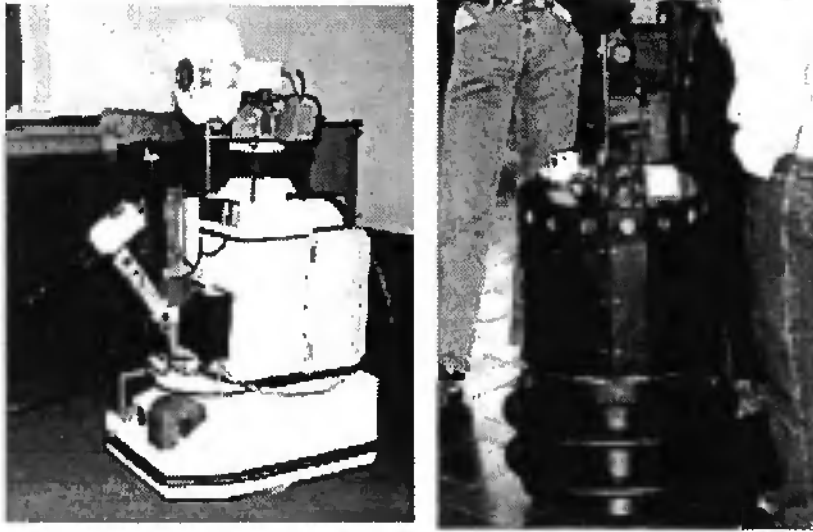


Figure 6.1 : David, le HERO-2000 (à gauche), et Goliath, le NOMAD-200 (à droite).

Le sonar (ou capteur ultrason) permet de donner une évaluation de la distance d'un obstacle dans une certaine orientation par rapport au robot. Il fournit une valeur calculée en fonction du temps écoulé entre l'émission et la réception par le capteur d'un signal acoustique renvoyé par l'environnement<sup>2</sup>.

Ce type de capteur est sensible aux caractéristiques physiques de l'environnement; des murs en sagex ou en liège, par exemple, absorbent plus le son que des murs en bois ou en métal.

Notre robot est équipé de 16 sonars disposés en couronne autour de la plate-forme. Ils fournissent des valeurs censées correspondre à des distances allant de 17 à 255 pouces (de 43 à 648 cm. environ).

Le capteur infrarouge fonctionne suivant le même mécanisme. Il est composé d'une LED émettrice et d'une diode photoélectrique réceptrice. Ainsi, la distance aux objets est déterminée en fonction de l'intensité lumineuse parvenant à la diode réceptrice, suite à une émission infrarouge de la LED émettrice qui est réfléchiée par l'environnement.

Ce type de capteur est fortement influencé par la capacité de réflexion des surfaces environnantes et par les conditions de luminosité ambiante. En particulier, le passage d'un environnement éclairé par lumière naturelle à un autre éclairé artificiellement (ou le même environnement à des heures différentes) peut fournir des données très variées pour des situations identiques. De même un pantalon clair reflète moins bien qu'un pantalon foncé.

Notre robot possède 16 capteurs infrarouges disposés en couronne. Leurs données sont censées correspondre à des distances allant jusqu'à 24 pouces (env. 61 cm).

Le *bumper* est un capteur permettant de détecter une pression qui s'exerce sur lui. Il sert à détecter des contacts physiques.

Notre robot en possède 20 répartis sur deux couronnes. Ceci permet de détecter un contact autour du robot avec une précision de 18 degrés.

Ce type de capteur est assimilable à notre système somato-sensoriel<sup>3</sup> en ce qui concerne la détection de contact (sensibilité tactile), sans toutefois pouvoir déterminer la nature de la surface ou la température de la source de contact, par exemple. Il peut servir à des tâches de détection d'obstacles ou de poussée d'objets.

<sup>2</sup>Ce mécanisme d'ultrasons apparaît chez les chauves-souris et chez les dauphins qui l'utilisent pour leur navigation.

<sup>3</sup>Partie du système nerveux qui traite l'information venant du corps (soma).

## 6. Le niveau physique

**Le compas magnétique** est un capteur qui fournit l'orientation du robot par rapport au Nord absolu.

Ce type de capteur est perturbé par tout champ magnétique. Ceci est courant en milieu fermé tel qu'un laboratoire où différents appareils peuvent perturber localement le champ magnétique.

Les informations données par le compas sont de nature différente de celles des capteurs précédents dans le sens où elles constituent une référence absolue et non relative au robot. Il est toutefois légitime de doter le robot d'un tel capteur dans le sens où l'information traitée est basée sur un phénomène naturel<sup>4</sup>.

**L'odométrie** permet de mesurer la position estimée du robot  $(x, y, \theta)$  par rapport à sa position initiale  $(0, 0, 0)$ , les vitesses de translation et de rotation de la base et la vitesse de rotation de la tourelle par rapport à la base. Ces valeurs sont remises à jour en fonction des commandes envoyées aux moteurs.

Ce capteur illustre un type de proprioception. Ces informations sont souvent utilisées dans le contrôle de robots. Elles encouragent l'utilisation de modèles géométriques du monde exploitables par le robot dans des tâches de navigation. A nos yeux, il s'agit d'un piège car ces informations sont très peu fiables<sup>5</sup>.

Nous évitons donc d'exploiter ce genre d'information et nous limitons à utiliser indirectement l'odométrie à travers les commandes envoyées au robot; en effet, ces commandes utilisent de façon interne l'odométrie pour contrôler la réalisation du mouvement demandé.

**La vision par lumière structurée** repose sur le couplage d'un plan laser et d'une caméra CCD. Ce capteur sert à détecter, par triangulation, la présence d'objets en deçà d'une certaine distance et dans une certaine direction. Il précise également la position azimutale de l'objet détecté.

Le laser projette sur le sol, devant le robot, une ligne observée par la caméra. Si le sol est plat, cette ligne reste à une hauteur fixe sur l'image lorsque le robot bouge. Par contre, la présence d'un objet dans la zone d'attention provoque une brisure de la ligne.

Ce capteur est perturbé par des variations de luminosité (qui peuvent faire disparaître la ligne), la couleur du sol (qui peut perturber le contraste sur la ligne), des vibrations du robot et des sols inégaux.

Le robot possède un de ces systèmes, pointé vers l'avant et sensible en deçà de 1.5 m. environ.

**La vision par balises** repose sur l'analyse de l'image vidéo fournie par une caméra équipée d'un objectif *fish-eye* offrant un grand angle de vision. Elle sert à détecter des cibles ou des balises dans l'environnement. On peut aider le système à détecter les cibles en équipant la caméra d'un tube fluorescent et en utilisant des balises rétro-réfléchissantes. La balise est isolée du reste des éléments de l'image par seuillage adéquat de cette image.

Ce capteur est perturbé par une luminosité ambiante trop importante ou par la présence dans la champ de vision d'objets possédant les mêmes propriétés rétro-réfléchissantes que les balises.

Le premier robot que nous avons utilisé, le HERO-2000, possède en plus

- des capteurs permettant de mesurer le degré de luminosité suivant plusieurs orientations, la température ambiante et le niveau sonore,
- un capteur permettant de mesurer le niveau des batteries (c'est là le seul capteur intéroceptif de nos robots).

<sup>4</sup>La plupart des espèces animales migratoires utilisent ce genre de mécanisme pour s'orienter. Certaines fourmis (dans le désert en particulier) ou certains arachnides [Carthy71], se dirigent par ce genre de mécanisme en s'orientant non pas sur la référence du champ magnétique terrestre mais d'après la position du soleil.

<sup>5</sup>Il suffit que le sol ne soit pas parfaitement nivelé ou que la surface soit glissante (linoléum) pour que le robot s'éloigne fortement de sa position estimée (on parle de dérive). Généralement, il suffit d'un aller-retour sur une distance de deux mètres pour se convaincre de l'imprécision de ces capteurs (l'odométrie dira que le robot est retourné à son point de départ  $(0, 0, 0)$  alors qu'on observe des écarts de plusieurs centimètres entre la position de départ et celle d'arrivée). La dérive est encore plus marquée dans les mouvements de rotation!

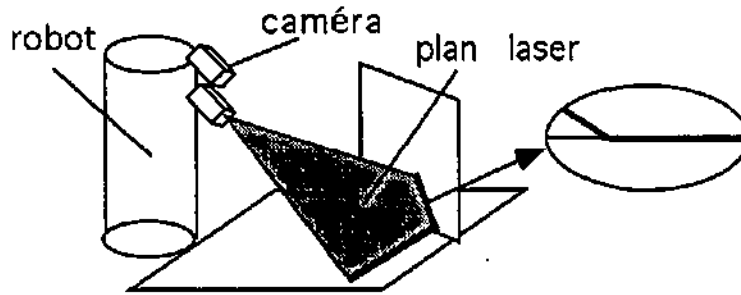


Figure 6.2 : Dispositif du système de vision par lumière structurée. (repris de [Gat-al.92a]).

En résumant, nos robots possèdent huit types d'extérocepteurs, un type de propriocepteur et un type d'intérocepteur. Le NOMAD 200, que nous avons utilisé dans le cadre de cette thèse ne possède aucun intérocepteur. Ainsi, nous utilisons explicitement les extérocepteurs et indirectement le seul propriocepteur à disposition: l'odométrie. Dans la suite, lorsque nous parlons de capteurs, nous couvrons conceptuellement les trois types de fonctions mais uniquement les extérocepteur d'un point de vue pratique.

Nous avons vu également qu'une caractéristique importante et globale à tous les capteurs est leur sensibilité aux perturbations ambiantes.

### 6.3 Capteurs et autonomie

Les capteurs déterminent les capacités sensorielles du robot; ils sont limités en nombre mais fournissent des informations riches et variées. Tous les robots ne sont pas forcément aussi riches en capteurs, d'autres ont des capacités encore plus variées et précises. En robotique, la partie qui s'occupe des capteurs est un domaine d'étude en soi.

Il est à noter que si chaque capteur est susceptible de subir des perturbations provenant de facteurs externes, indépendantes du robot lui-même, la réunion de différents capteurs sur une même plate-forme peut conduire à des interférences entre capteurs; par exemple, le néon du système de vision par balises peut influencer les capteurs infrarouges ou le système de vision par lumière structurée.

D'autre part, chaque capteur fournissant des informations de nature différente, mesurant des phénomènes différents, ils sont utiles à des tâches différentes; un capteur peut permettre de résoudre à lui seul une fonctionnalité et être totalement inutile pour un autre emploi. A l'inverse, un même capteur peut servir à des fonctionnalités de nature différente: le dauphin, par exemple, émet des sons qui, suivant leur fréquence, lui servent à sa navigation selon un mécanisme de sonar (de 20 à plus de 100 kHz) ou à la communication inter-dauphins (de 1 à 20 kHz: cette zone est partiellement audible pour l'être humain - de 1 à 8 kHz environ).

Ainsi, la plage de fréquences audibles par le dauphin est beaucoup plus large que celle de l'Homme. Cet exemple permet de rappeler que la plupart des espèces animales démontrent des capacités impressionnantes dues au développement de capteurs spécifiques leur ayant permis de s'adapter à leur milieu et de survivre en palliant certaines carences.

### 6.4 Les effecteurs

Notre robot NOMAD 200 est constitué d'une base et d'une tourelle indépendante. Nous ne considérons aucun bras articulé muni d'une pince en son extrémité, comme sur le HERO-2000.

## 6. Le niveau physique

Le robot possède trois moteurs et trois roues. Un premier moteur s'occupe de la translation simultanée des trois roues, un second de leur rotation simultanée. Le robot peut effectuer des rotations autour de son centre en maintenant sa base immobile. Enfin, le troisième moteur s'occupe de la rotation de la tourelle par rapport à la base.

Les déplacements du robot peuvent être contrôlés suivant différents modes: en commandes absolues (va en  $(x, y)$ ), en commandes relatives (tourne de  $x$  et avance de  $y$ ), en vitesse (avance à vitesse  $x$  tout en tournant à vitesse  $y$ ) ou en accélération (avance en accélérant de  $x$  et en tournant à accélération de  $y$ ).

### 6.5 Effecteurs et autonomie

Si certaines analogies sont frappantes entre les capteurs du robot et des mécanismes présents chez des espèces animales, ceci n'est plus le cas pour les organes effecteurs; aucun animal n'utilise la roue pour se mouvoir, tous utilisent leurs pattes, leurs nageoires, leurs ailes ou les ondulations de leurs corps pour se déplacer.

Certaines applications robotiques, observant ces différences et s'intéressant à mimer les organes des espèces animales, ont donné lieu à des robots à pattes (voir [Brooks90, Beer90, Heizelmann93] ou la figure 3.10).

Malgré le manque d'analogies physiques, la fonction reste la même. Les effecteurs sont un élément essentiel de l'autonomie dans le sens où ils portent le mouvement sans lequel l'autonomie est limitée à une interaction végétative.

### 6.6 La communication

Les traitements liés au contrôle des capteurs et des effecteurs sont faits sur la plate-forme robotique (*on-board*). Les programmes que nous avons développés tournent sur stations de travail, c'est-à-dire *off-board*.

Une communication entre les stations et le robot doit donc être prévue. Dans notre cas, elle peut se faire par câble RS-232 ou par radio, à 9600 bits/sec. Le module de communication radio étant fiable et puissant, nous avons pu abandonner le câble<sup>6</sup>.

Le pas suivant de notre développement consiste à porter nos algorithmes sur la plate-forme elle-même. Ceci est envisageable car le robot est équipé d'un PC. C'est lui qui s'occupe, notamment, du contrôle des capteurs, des effecteurs et de la communication. Une autre solution consiste à charger la station de travail sur le robot en l'alimentant à partir d'une batterie supplémentaire.

### 6.7 Commentaires

Les éléments constitutifs du niveau physique d'ARCO (les capteurs et les effecteurs) sont une première base à l'autonomie de l'agent que nous modélisons. Ils déterminent d'ailleurs l'agent en tant que tel, du fait que nous le définissons comme un "artefact ayant des capacités de perception et d'action".

L'évaluation des capacités physiques de notre robot peut varier selon le point de vue adopté. En tant que robot, il s'agit d'une plate-forme présentant une bonne variété de capteurs et souffrant des insuffisances propres à ce genre de dispositif technologique. Il est pourtant fréquent

---

<sup>6</sup>Bien que la situation reste identique (le robot est toujours contrôlé par les programmes tournant sur les stations SUN) cette "coupure du cordon ombilical" donne l'impression, à l'observateur externe, d'une plus grande autonomie.

que l'observateur d'un tel système prenne une attitude anthropomorphique pour établir son jugement, ce qui conduit inévitablement à une sous-évaluation de ses capacités<sup>7</sup>.

D'autre part, l'illustration du premier niveau de l'architecture ARCO par la description des capacités de notre robot NOMAD 200 nous a portés à relever plusieurs analogies entre ce système artificiel et certains organismes vivants. Face à ces analogies, nous adoptons dans ce travail trois positions interprétatives: celles du concepteur, du scientifique et du rédacteur.

En tant que concepteur, du point de vue de l'ingénieur, nous sommes naturellement portés à faire des comparaisons dans le but d'améliorer les performances physiques et donc comportementales de notre système.

Pourquoi la chauve-souris, dont la navigation aérienne est essentiellement basée sur un système sonar, est-elle si performante? Plusieurs facteurs peuvent intervenir dans l'explication: son anatomie, sa structure neuronale, ses traitements internes de l'information, la qualité de ses capteurs, leur capacité d'adaptation.

De la même façon, connaissant les caractéristiques des capteurs du robot, on peut tenter d'interpréter, parfois même d'expliquer, les comportements d'espèces animales ou leur mode de vie. Par exemple, pourquoi ces chauves-souris naviguent-elles en milieu externe uniquement de nuit? Les capteurs qu'elles utilisent en sont partiellement responsables.

Cette première approche de l'analogie peut permettre à l'ingénieur d'utiliser, de façon plus adéquate, les capteurs du système qu'il construit.

En tant que scientifiques, notre tâche est de rester conscient qu'il s'agit uniquement d'analogies et de s'intéresser aux différences, plutôt qu'aux analogies, afin d'expliquer les lacunes méthodologiques de notre approche et envisager de nouvelles voies de recherche.

En particulier, il est important de considérer que l'appareil sensori-moteur et l'animal qui le porte présentent la caractéristique d'avoir *co-évolué*. Cette remarque s'applique aussi bien à l'échelle de l'individu, dans une évolution ontogénétique, qu'à l'échelle de l'espèce, dans une évolution phylogénétique.

Sur notre robot, par contre, les capteurs sont là, donnés et figés. Ils n'ont généralement pas été construits dans une perspective évolutionniste. Ainsi, ils n'offrent pas une "interface" permettant de les faire évoluer<sup>8</sup>. Le temps ne les influence que dans le sens d'une détérioration physique.

Ce manque de capacités évolutives au niveau physique constitue une différence fondamentale entre le vivant et l'artificiel. La réflexion au niveau physique de nos agents en fait prendre conscience.

Enfin, en tant que rédacteur, notre devoir est d'utiliser ces analogies à bon escient en évitant qu'elles ne prêtent à confusion. Notre souci est d'y parvenir.

Relevons que, dans le monde animal, la nature et les performances des capteurs d'un individu caractérisent l'espèce à laquelle il appartient; ils établissent les capacités sensori-motrices et donc les capacités comportementales de l'ensemble de l'espèce.

De la même façon, nous percevons chaque robot particulier, comme membre d'une catégorie robotique, limitée par ses capacités physiques et, par conséquent, limitée en capacités sensori-motrices, comportementales et cognitives. Toutefois, ces limitations ne sont pas à prendre comme une restriction sur le plan de la modélisation; elles permettent d'orienter nos choix méthodologiques en donnant un cadre de possibilités.

Finalement, remarquons que certains systèmes autonomes, et en particulier des systèmes vivants, sont équipés de capteurs moins variés et performants que ceux de notre robot. C'est,

---

<sup>7</sup>Dans ce sens, la vision ayant une part si importante dans la perception de notre milieu, il est normal de constater que nous avons tendance à nous considérer comme des organismes mono-sensoriels, alors que nous possédons cinq sens et que chacun d'eux nous sert continuellement (souvent inconsciemment) dans notre vie quotidienne. Nous sommes, comme on l'a dit, également équipés de capteurs procurant à notre système nerveux des informations internes à notre corps, à travers les propriocepteurs et les interocepteurs. En travaillant avec un robot multi-sensoriel tel que le notre, nous prenons conscience de la nécessité d'en exploiter judicieusement toutes les modalités mises à disposition. C'est là une première étape vers l'autonomie du système.

<sup>8</sup>Thomas Wherle a récemment abordé cette problématique en simulation [Wherle94].

## 6. *Le niveau physique*

dans une large mesure, par l'utilisation qu'ils font de ces capteurs, fruit d'une co-évolution efficiente, que ces systèmes proposent différentes solutions à l'autonomie.

## **Modélisation d'un agent autonome**

# Le niveau comportemental

Les capacités comportementales constituent le niveau intermédiaire de l'architecture ARCO.

Ce niveau est au centre de toute la dynamique du système; il intervient, comme nous l'avons vu au chapitre 5, dans les deux boucles d'interaction internes (la boucle comportementale et la boucle cognitive) et dans deux des trois boucles d'interaction externes (la boucle d'activité et la boucle de fonctionnalisation). C'est donc un élément essentiel de l'architecture, qui porte l'activité et la rend réactive par un traitement de nature située.

Ce chapitre va nous permettre de préciser la nature des comportements que nous modélisons. Ceci permet de discerner l'apport du niveau comportemental à la boucle comportementale (interaction avec le niveau physique) et à la boucle d'activité (interaction avec l'environnement, à travers le niveau physique).

Nous donnons également un formalisme permettant de décrire l'agent comportemental. Ce formalisme sera utilisé au niveau cognitif, dans le cadre d'un raisonnement portant sur les propriétés de l'activité. Cela permet de considérer l'apport du niveau comportemental à la boucle cognitive (interaction avec le niveau cognitif) et à la boucle de fonctionnalisation (interaction du niveau cognitif avec l'environnement à travers les niveaux inférieurs).

Nous illustrons l'approche par quatre comportements simples de navigation destinés au robot mobile.

## 7.1 Nature de l'activité

Sans vouloir tomber dans des analogies faciles ou simplistes entre les agents artificiels que nous modélisons et les organismes vivants, il est intéressant d'analyser les notions de comportement, réflexe et instinct, afin de préciser la nature de l'activité de notre agent.

### 7.1.1 Le comportement, le réflexe et l'instinct

De façon générale, le comportement est une vue objective de l'activité globale d'un système. Le point de vue y est externe à l'agent.

Les concepts de réflexe<sup>1</sup> et d'instinct<sup>2</sup>, par rapport à la nature interne de l'agent et dans le souci de caractériser le comportement, sont des abstractions plus précises. Pour notre approche de l'activité, la différence entre le réflexe et l'instinct porte sur leur rapport avec l'action résultante.

Dans des conditions normales, le réflexe est involontaire et par conséquent inévitable; l'excitation sensorielle, ou stimulus, s'y convertit irrémédiablement en action (réaction).

L'instinct est par contre une impulsion intérieure, une tendance et non une action; le stimulus provoque une excitation interne, sans forcément aboutir à l'action effective. De plus, bien que l'action résultante puisse se dérouler sans réflexion (de façon automatique et située), ce n'est qu'à travers un choix que l'instinct s'exprime en action.

<sup>1</sup> *Réflexe*: Phénomène nerveux consistant en une réponse déterminée, immédiate et involontaire de l'organisme à une excitation particulière.

<sup>2</sup> *Instinct*: Impulsion naturelle. Premier mouvement qui dirige les animaux dans leur conduite. Chez l'homme, impulsion intérieure, indépendante de la réflexion.

Ainsi, d'un point de vue interne, nous différencions le réflexe et l'instinct par le type de structure par laquelle ils lient la perception à l'action; le réflexe semble porté par une liaison directe alors que l'instinct transite par un élément de choix qui favorise ou non son expression en action.

### 7.1.2 Une activité instinctive

Le niveau comportemental d'ARCO est constitué d'actions situées, implantées par des boucles sensori-motrices (liant la perception à l'action). Elles ressemblent à des réflexes et à des instincts.

Les premiers ne sont pas contrôlés par l'agent; ils agissent automatiquement sur l'action. Leur rôle est d'assurer l'intégrité physique dans des situations extrêmes.

Les instincts, par contre, forment les unités contrôlées par le niveau cognitif. Ainsi, c'est en termes d'instincts que nous nous référons à l'activité contrôlée de l'agent.

Il s'agit là, à nouveau, d'une analogie quelque peu anthropomorphe. Néanmoins, elle a l'avantage d'être plus précise que celle de comportement, couramment utilisée et tout aussi abusive. De plus, et particulièrement en sciences cognitives, elle contribue à fixer l'intuition d'un public hétérogène quant à la nature située mais contrôlable de l'activité.

### 7.1.3 Capacités innées et capacités acquises

Il est important de noter que, par opposition à d'autres travaux comportementaux, nous traitons l'instinct comme une capacité innée de l'agent et ne traitons en aucun cas la faculté d'apprentissage, par l'agent lui-même, des mécanismes d'activité. Dans notre cas, les boucles sensori-motrices sont pré-programmées et donc données a priori.

Ce choix peut s'appuyer sur l'observation de Konrad Lorenz<sup>3</sup> qui écrit

“les coordinations des mouvements de l'acte instinctif sont déterminées d'une manière innée jusqu'aux moindres détails” ... Nous devons être “méfiants à l'égard de toute affirmation concernant la modification adaptative de l'acte instinctif par l'expérience individuelle. ... dans tous les cas où on a pu constater une modification apparemment adaptative d'un acte instinctif par l'expérience personnelle, il s'agissait d'un *processus de maturation*<sup>4</sup>.” [Lorenz 37 (p.67)].

Ces réflexions nous poussent à considérer l'apprentissage comportemental comme étant judicieux lorsque l'anatomie de l'agent évolue au cours du temps. Ce n'est pas le cas pour l'agent que nous modélisons.

Toutefois, ce choix ne dénie en aucun cas l'importance de l'apprentissage dans le phénomène d'autonomie.

De même, d'un point de vue d'ingénieur, les techniques d'apprentissage (algorithmes génétiques, réseaux de neurones artificiels) sont particulièrement bien adaptées à l'optimisation et à la mise au point de comportements situés. Les travaux cités au chapitre 3 l'ont bien démontré. L'avantage majeur de ces techniques est, dans ce contexte, d'éviter au programmeur une phase longue et délicate de calibrage des paramètres.

En ce qui nous concerne, l'apprentissage sera utilisé uniquement au niveau cognitif (voir chapitre 9).

---

<sup>3</sup>Ethologue autrichien (1903-1989), prix Nobel de médecine en 1973 partagé avec N. Tinbergen et K. von Frisch.

<sup>4</sup>*Maturation*: Evolution liée au développement d'un organe et à la coordination des mouvements instinctifs déterminant son utilisation.

## 7.2 Un langage de description

Dans le but d'introduire une formalisation des instincts tels que nous les modélisons, nous allons spécifier leurs caractéristiques majeures. Nous formaliserons ensuite ces principes pour fournir un langage de description comportementale utilisable au niveau cognitif.

### 7.2.1 Caractérisation des boucles sensori-motrices

- Chaque instinct est lié à un ensemble particulier de capteurs et d'effecteurs.
- Les instincts sont virtuellement indépendants. Ils peuvent en pratique accéder aux mêmes sources d'informations (capteurs ou représentations internes) mais ils ne communiquent pas entre eux.
- L'instinct a la capacité d'extraire certaines caractéristiques invariantes (stimuli) à partir des données capteurs (signaux). Chaque instinct est spécialisé dans l'extraction de caractéristiques particulières.
- Un stimulus<sup>5</sup> est soit présent, soit absent; aucun degré intermédiaire n'est considéré.
- L'observation de certaines configurations de caractéristiques extraites (état perçu) stimule l'instinct.
- L'instinct stimulé affiche une certaine tendance, exprimée à travers la génération d'une commande destinée aux effecteurs qu'il peut contrôler. Elle est fonction de l'état perçu et de l'état interne de la boucle. Si l'instinct n'est pas stimulé, il ne produit aucune commande.
- Bien que les notions d'instinct et de stimulus soient liées (l'instinct est sensible à un ensemble de stimuli), ce sont là deux abstractions distinctes.
- Pour des questions de réactivité, le temps de cycle de l'instinct est court. Des traitements en temps réel sont souhaitables.
- Le traitement de l'information à l'intérieur de l'instinct se fait en continu. Les instincts s'exécutent donc en parallèle, afin d'apporter une attention permanente et une polyvalence maximale.

Il est à noter qu'aucune notion de but n'intervient dans notre concept d'instinct. Nous pouvons tout au plus considérer une certaine tendance pré-programmée dans l'action, s'exprimant essentiellement par la volonté de maintenir un stimulus ou de le perdre. D'un point de vue externe, ceci correspond à des attitudes d'attraction ou de fuite<sup>6</sup>.

Les caractéristiques ci-dessus sont celles intervenant dans la dynamique d'ARCO portée par la boucle comportementale. Les instincts possèdent également deux caractéristiques liées à leur intervention dans la dynamique de la boucle cognitive:

- chaque instinct informe le niveau cognitif de la présence ou de l'absence des configurations de stimuli auxquelles il est sensible,
- une commande produite par un instinct n'est pas forcément envoyée aux effecteurs; le niveau cognitif peut empêcher cet envoi, auquel cas l'instinct ne s'exprime pas en action effective.

---

<sup>5</sup>On distingue généralement le stimulus "distal" (l'objet ou l'événement donnant lieu à la stimulation) du stimulus "proximal" (l'excitation périphérique sur l'appareil sensoriel récepteur). Dans le texte, les apparitions du terme stimulus ont jusqu'ici fait référence tantôt à l'un tantôt à l'autre. Dans la suite, ce terme fait référence exclusivement au stimulus "proximal", à une caractéristique interne au système.

<sup>6</sup>Nous retrouvons ici la notion de tropisme (taxie/pathie) exploitée par le mouvement comportementaliste et par le paradigme d'eco-résolution [Ferber90] en particulier.

Précisons que l'instinct stimulé n'est pas informé de sa sélection ou inhibition par le niveau cognitif. Cette information serait nécessaire, en particulier, si les boucles sensori-motrices étaient adaptatives. En effet, il faut dans ce cas que la boucle sache si elle est la cause d'une variation observée ou non. Dans notre cas, l'instinct n'a pas besoin de cette information.

## 7.2.2 Une formalisation de l'activité

Cette spécification intuitive de l'instinct permet de formaliser le niveau comportemental de façon à satisfaire les besoins d'interfaçage entre le niveau comportemental et le niveau cognitif dans l'architecture ARCO. Soient

$\mathcal{I} = \{i_1, \dots, i_n\}$  : l'ensemble des  $n$  instincts dont l'agent est doté,  
 $\mathcal{S} = \{s_1, \dots, s_m\}$  : l'ensemble des  $m$  stimuli liés aux instincts de l'agent.

Du point de vue de l'agent, tout stimulus est présent ou absent à un moment donné. Ainsi, l'agent discrétise l'espace temporel en intervalles sur lesquels l'ensemble des stimuli présents est constant. Nous appelons ces intervalles temporels des *instants sensoriels*<sup>7</sup>.

Dès lors, si  $\wp(\mathcal{S})$  est l'ensemble des parties<sup>8</sup> de  $\mathcal{S}$  et  $\wp(\mathcal{I})$  l'ensemble des parties de  $\mathcal{I}$ , la fonction de stimulation  $\mathcal{F}$  de l'agent est donnée par l'application

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F} : \wp(\mathcal{S}) & \longrightarrow & \wp(\mathcal{I}) \\ \alpha & \longmapsto & \beta \end{array}$$

Ainsi, étant donné le sous-ensemble  $\alpha \subseteq \mathcal{S}$  de stimuli perçus par l'agent en un instant sensoriel déterminé, l'application  $\mathcal{F}$  fournit l'ensemble  $\beta$  des instincts, éléments de  $\mathcal{I}$ , stimulés (et sélectionnables par le niveau cognitif) à cet instant sensoriel.

$\wp(\mathcal{S})$  représente l'espace sensoriel de l'agent; à tout instant sensoriel l'agent perçoit un élément de  $\wp(\mathcal{S})$  nommé *état sensoriel*. Remarquons que les stimuli peuvent être indifféremment provoqués par des facteurs externes ou internes à l'agent; leur traitement est identique car les stimuli ne sont pas différenciés en fonction de leur provenance (extéroception, intéroception ou proprioception).

De façon similaire,  $\wp(\mathcal{I})$  représente l'espace de stimulation de l'agent; à tout instant sensoriel, l'agent est dans un *état de stimulation*, élément de  $\wp(\mathcal{I})$ . Il est à noter que  $\mathcal{F}$  n'est pas forcément une bijection du fait qu'elle n'est pas forcément une injection; plusieurs états sensoriels différents peuvent correspondre à un même état de stimulation (c'est d'ailleurs ce qui justifie sa définition).

## 7.3 Remarques

### 7.3.1 Le choix des stimuli pertinents

Nous avons insisté au paragraphe 7.1.3 sur le fait que les boucles sensori-motrices que nous considérons sont pré-programmées et correspondent donc à des capacités innées. Ainsi, la conception de ces boucles d'activité passe par le choix délicat et important des caractéristiques pouvant (a) et devant (b) être traitées par la boucle.

- a) Toute caractéristique jugée pertinente pour l'activité de l'agent n'est pas forcément extractible des données capteurs mises à disposition par le niveau physique. En effet, pour un agent particulier, l'ensemble des capteurs est limité et le type d'informations fournies l'est également. L'approche synthétique dont nous parlions au paragraphe 5.3 introduit ici une première contrainte, par le fait que le niveau comportemental se consacre exclusivement à exploiter des ressources limitées, offertes par le niveau physique.

<sup>7</sup>Le choix du terme *instant*, plutôt qu'intervalle, sera justifié au paragraphe 8.7.1

<sup>8</sup>Ensemble des sous-ensembles possibles de  $\mathcal{S}$ .

## 7. Le niveau comportemental

- b) Le choix opportun et le traitement adapté d'une caractéristique est un élément essentiel pour la robustesse et la fréquence de la boucle. En aval dans le traitement, ce choix influence également la stabilité du système global; par exemple, pour une activité de navigation asservie sur une caractéristique en environnement fermé, l'axe médian de l'espace libre s'avère être une caractéristique plus régulière que le bord de ce même espace libre. La première caractéristique est plus judicieuse que la seconde, même si les deux peuvent être utilisées dans une tâche de navigation.

Il nous paraît important de relever que la catégorisation sensorielle faite par notre agent est innée. En poursuivant dans le sens de la remarque de Lorenz sur l'ontogenèse, l'appareil sensoriel de notre agent étant préétabli, nous ne considérons pas l'acquisition ou l'évolution des catégories sensorielles. Ainsi, la détérioration progressive d'un capteur particulier conduira à l'observation d'incohérences<sup>9</sup> sans provoquer de variation des catégories observables. Nous reviendrons sur ce sujet au paragraphe 9.2.2.

### 7.3.2 Intensité de stimulation: dichotomique ou multi-valuée

Il est reconnu que, pour le réflexe, l'intensité<sup>10</sup> du stimulus est un facteur déterminant (quantitativement et qualitativement) dans la réponse qu'il provoque. Cette relation, pour un réflexe, s'exprime dans une certaine contiguïté temporelle, ce qui facilite son analyse. Il est par contre plus délicat d'évaluer la part d'influence que possède l'intensité de stimulation sur un comportement global ou sur les capacités cognitives.

Dans notre travail, l'intensité du stimulus (variable pouvant être multi-valuée par traitement numérique, probabiliste, logique floue ou autres) est prise en considération uniquement au niveau comportemental. Cette caractérisation disparaît au niveau cognitif du fait que le formalisme que nous venons d'introduire considère le stimulus par rapport à sa présence ou son absence uniquement (en tout ou rien).

Ce traitement dichotomique de la stimulation peut être vu comme une limitation dans le sens où nous considérons qu'aucune information d'intensité de stimulation n'est nécessaire au niveau cognitif. Toutefois, du fait de l'imbrication des dynamiques liées à l'architecture ARCO (voir paragraphe 5.2), la prise en compte de l'intensité au niveau comportemental revient à dire que l'intensité de stimulation peut influencer aussi bien l'activité que la fonctionnalisation (à travers les boucles externes d'activité et de fonctionnalisation).

Ainsi, bien que seule l'information de présence (ou d'absence) du stimulus soit envoyée au niveau cognitif par l'instinct, son intensité peut tout de même intervenir dans le traitement fait par l'instinct ou même directement dans le jugement de la présence ou de l'absence du stimulus (seuil contrôlable par l'instinct).

## 7.4 Illustration

Dans le but de favoriser l'intuition du niveau comportemental, nous allons introduire un exemple simple de boucle sensori-motrice donnant lieu à quatre instincts de navigation. Ces instincts ont été implantés et ont fait l'objet d'une application de navigation dans les corridors de notre laboratoire. D'autres instincts ont également été implantés, dans le cadre du projet MARS, mais n'ont pas été intégrés dans cet exemple, notamment ceux liés à la vision (vision par balises et vision par lumière structurée). Ils sont décrits dans [Gat-al.92a].

<sup>9</sup>L'agent n'observe, par exemple, que des sous-ensembles d'états sensoriels attendus.

<sup>10</sup>En psychophysologie, suivant la nature du stimulus externe (visuel, auditif, tactile, olfactif ou gustatif), son intensité est mesurée en unités différentes (luminance, décibels, force ou concentration, respectivement) sur des échelles multi-valuées. L'influence de l'intensité du stimulus sur le réflexe qu'il déclenche peut donc être précisément déterminée.

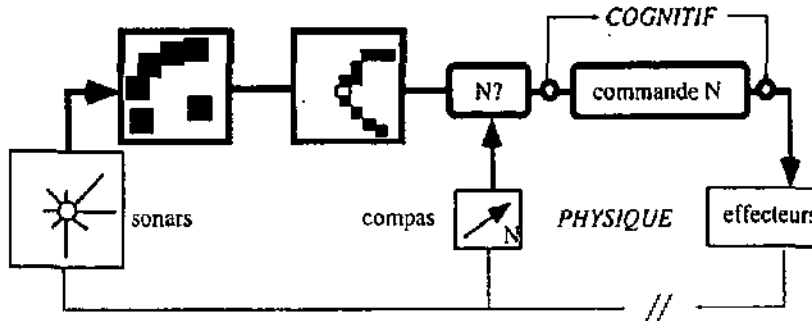


Figure 7.1 : Boucle sensori-motrice correspondant à l'instinct "suivi de lien vers le Nord".

### 7.4.1 Quatre instincts simples

Le type d'instinct considéré ici est basé sur les capteurs sonars et le compas magnétique du niveau physique de notre robot. Chaque instinct exprime une tendance à suivre des corridors (passages libres) dans l'une des quatre directions absolues (N, S, E, W).

Les données sonar permettent de reporter les obstacles détectés sur une carte 2D d'où la boucle sensori-motrice extrait le squelette correspondant à l'axe médian de l'espace libre. Ce squelette est une caractéristique sensorielle, susceptible de stimuler un ensemble d'instincts portés par différentes boucles sensori-motrices. Le squelette est centré sur le robot et peut être formé de plusieurs axes qui sont autant de voies que le robot est capable et susceptible de suivre dans ses tâches de navigation. Enfin, le compas permet d'orienter la carte par rapport au Nord absolu et de déterminer ainsi l'orientation des axes du squelette de l'espace libre observé.

La figure 7.1 représente la boucle de l'instinct "suivi de lien vers le Nord", stimulé par la présence d'un axe libre dans la direction Nord. Trois autres boucles similaires constituent les instincts de "suivi de lien vers le Sud", "... vers l'Est" et "... vers l'Ouest".

La présence d'un axe dans la direction de sensibilité stimule l'instinct particulier qui engendre une commande tendant à faire naviguer le robot le long de l'axe observé. La commande correspond à des consignes de vitesse en translation et rotation.

La fréquence de ce type de boucle est proche du hertz; un instinct stimulé et sélectionné envoie aux effecteurs une commande par seconde en moyenne. Le traitement peut être accéléré mais ces performances se sont avérées suffisantes pour notre application. L'agent est suffisamment réactif<sup>11</sup>.

Nous observons également sur la figure 7.1 deux circuits symbolisant l'interface de l'instinct avec le niveau cognitif. A chaque cycle de la boucle de traitement, l'instinct informe de la présence ou de l'absence du stimulus attendu à travers le circuit de gauche. Dans le cas représenté, une seule caractéristique sert de stimulus mais, généralement, plusieurs caractéristiques peuvent être traitées et annoncées par un même instinct. L'ensemble des données provenant des instincts permet au niveau cognitif de déterminer l'état sensoriel courant. Le circuit de droite symbolise le mécanisme par lequel le niveau cognitif peut inhiber l'instinct ou le sélectionner en interrompant ou non la liaison avec les effecteurs du niveau physique<sup>12</sup>.

<sup>11</sup>Si la notion de temps réel correspond à "avoir la même fréquence que l'acquisition du capteur", nos instincts sont, d'un point de vue informatique, des boucles temps réel. En effet, la fréquence d'acquisition du système sonar est également proche du hertz. Cette remarque peut être appliquée à toutes les boucles sensori-motrices utilisées dans nos expériences.

<sup>12</sup>En fait, nous avons vu au paragraphe 5.4 que la sélection d'un comportement se fait en déposant son identité sur le tableau noir comportemental. Conceptuellement, il s'agit du même mécanisme de sélection d'actions.

### 7.4.2 Formalisation de l'exemple

Dans cet exemple, les ensembles  $\mathcal{I}$  et  $\mathcal{S}$  contiennent chacun quatre éléments:

$\mathcal{I} = \{ \text{"suivi de lien vers le Nord"}, \text{"... Sud"}, \text{"... Est"}, \text{"... Ouest"} \}$

$\mathcal{S} = \{ \text{"lien Nord"}, \text{"lien Sud"}, \text{"lien Est"}, \text{"lien Ouest"} \}$

La fonction de stimulation  $\mathcal{F}$  se résume à l'application associant la présence d'un stimulus "lien X" à la stimulation de l'instinct "suivi du lien vers le X".

### 7.4.3 Mesure combinatoire de l'espace sensori-moteur de l'agent

Notre formalisation en théorie des ensembles nous oblige à considérer la taille des espaces générés par tout choix et spécification d'un niveau comportemental caractérisant un agent particulier.

Nous voulons spécialement attirer l'attention sur le fait que si les espaces théoriquement possibles sont complexes, les contraintes naturelles apparaissant entre stimuli et la nature propre à chaque environnement provoquent une réduction importante de la taille de ces espaces, ce qui permet d'envisager des espaces effectifs dont la complexité est abordable aux traitements de l'agent.

Etant donnés  $s$  stimuli ( $s = |\mathcal{S}|$ ) et  $i$  instincts ( $i = |\mathcal{I}|$ ), la taille de l'espace sensoriel possible est de  $T_s = 2^s$  et celle de l'espace de stimulation possible est de  $T_i = 2^i$ .

$\mathcal{F}$  est une application particulière parmi les  $T_i^{T_s}$  possibles.

Or, bien que la taille des espaces croisse exponentiellement avec la taille des capacités sensori-motrices de l'agent, seule une partie de ces espaces intervient dans les applications réelles, ce qui réduit considérablement la taille des espaces effectifs; en général toutes les configurations possibles n'apparaissent pas.

Pour l'espace sensoriel, il existe des dépendances entre stimuli: la présence d'un stimulus peut, par exemple, être liée à la présence ou l'absence d'autres stimuli. Ceci réduit considérablement la taille de l'espace sensoriel effectif  $T_s^*$ .

Imaginons que parmi 10 stimuli, 4 soient liés (si l'un est présent, les trois autres sont absents, par exemple). La taille de l'espace sensoriel possible est réduite de  $2^{10}$  à  $2^7$ . Pour une dépendance simple de ce genre, la taille de l'espace est donc réduite de 90%. Ce genre de corrélation entre stimuli est fréquent.

De plus certains des états sensoriels encore possibles n'apparaissent pas dans un environnement particulier. Ceci situe la taille de l'espace sensoriel effectif à  $T_s^* \leq 2^7$  (dans l'exemple donné), ce qui revient à dire que l'espace sensoriel effectif est inférieur au dixième de l'espace sensoriel possible ( $T_s^* \leq 10\%T_s$ ).

Pour l'espace de stimulation effectif  $T_i^*$ , l'application  $\mathcal{F}$  n'étant pas forcément injective (deux états sensoriels différents peuvent provoquer le même état de stimulation), nous avons  $T_i^* \leq T_i$ . Dans notre exemple,  $T_i^* \leq 2^7$ .

### 7.4.4 L'environnement physique et environnement sensoriel

L'environnement physique de notre exemple constitue le milieu de l'agent. Il s'agit d'un environnement fermé, délimité par quelques couloirs de notre laboratoire. Les quatre instincts de l'exemple illustratif ont été conçus pour pouvoir réaliser des tâches de navigation dans tout environnement de ce genre.

La figure 7.2 représente le milieu (en forme de 7) sur lequel nous avons projeté les différents états sensoriels (combinaisons des stimuli N, S, E et W) que l'agent est susceptible d'observer suivant la zone de l'environnement dans laquelle il se trouve. Les instincts sont identifiés par des nombres, les états sensoriels par des lettres.

Notons que, des 16 états sensoriels possibles, il est probable que seuls sept apparaissent dans cet environnement particulier (moins de 50%). Pour un environnement plus complexe, un

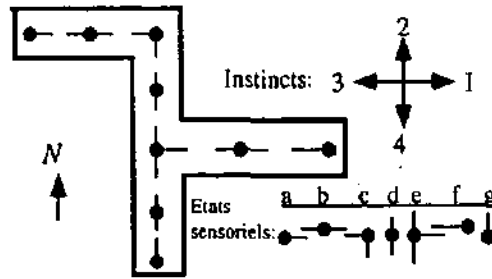


Figure 7.2 : Etats sensoriels situés dans l'environnement test.

labyrinthe par exemple, les seize apparaîtraient. Ceci est dû au fait que, dans cet exemple, il n'existe aucune dépendance entre stimuli.

Il est également intéressant de constater que l'agent est stimulé en tout endroit de ce milieu particulier. Pourtant, il est possible d'envisager, notre formalisme ne s'y opposant pas, que l'agent ne soit pas stimulé par moments (dû à l'absence de stimuli ou à l'influence du bruit sur les capteurs). Une restriction s'impose donc quant à la définition de l'application  $\mathcal{F}$ . Elle devient:

$$\mathcal{F} : p(S) \longrightarrow p(I) - \{\emptyset\}$$

Ceci revient à dire que, quel que soit l'état sensoriel observé (même  $\emptyset$ ), un instinct au moins sera stimulé et sélectionnable. On peut, par exemple, considérer un instinct de mouvement aléatoire stimulé en tout instant, quel que soit l'état observé. Dans ce cas, l'instinct est stimulé par l'absence même de caractéristiques stimulantes (état sensoriel  $\emptyset$ ).

## 7.5 Discussion

En résumé, le contenu de notre niveau comportemental est, comme pour la majorité des comportements d'agents situés, de nature réactive. En exploitant les propriétés des boucles de rétroaction, les instincts que nous proposons sont, d'un point de vue interne, autant de tendances d'attraction ou de répulsion par rapport à certains stimuli externes (extéroception) ou internes (intéroception et proprioception). D'un point de vue externe, ces tendances apparaissent comme des comportements variés.

L'élément novateur de ce traitement comportemental est de proposer un formalisme qui permet, de façon simple et efficace, de décrire les capacités sensori-motrices d'un agent particulier et de caractériser ainsi son activité. Ce langage de description permet de lier la couche comportementale à la couche cognitive de l'architecture ARCO. Pour la dynamique interne de l'architecture, ce formalisme est donc essentiel à la boucle cognitive et, par conséquent, à la boucle de fonctionnalisation.

# Le niveau cognitif

## 8.1 Introduction

La psychologie cognitive est une discipline située au carrefour de la biologie, de la psychologie, de la linguistique et de l'informatique. Elle a pour objet d'étude les mécanismes de la pensée grâce auxquels s'élabore la connaissance, depuis la perception, la mémoire et l'apprentissage, jusqu'à la formation des concepts et au raisonnement logique.

Ces mêmes préoccupations apparaissent au troisième niveau d'abstraction de l'architecture ARCO. Ainsi, nous parlons d'*architecture cognitive* et de *modèle cognitif* pour nous référer respectivement à la structure et au contenu de ce troisième niveau d'abstraction.

Ce chapitre a pour objet de décrire le contenu et la dynamique du niveau cognitif. Rappelons qu'il s'agit d'un modèle particulier parmi les modèles cognitifs possibles pour le contrôle d'un agent comportemental, dans le cadre de l'architecture ARCO.

Nous commençons par décrire les composants de la structure globale du niveau cognitif; la connaissance et ses mécanismes de gestion, les processus cognitifs. Ces derniers seront traités au chapitre 9. Nous nous concentrons ici sur le thème de la connaissance.

Après un survol des concepts généraux et de la terminologie utilisée, nous donnons la position épistémologique adoptée dans cette thèse quant à la connaissance adaptée à un modèle d'agent autonome. Ceci nous conduit à exposer la problématique introduite par notre choix et à détailler la solution que nous proposons.

Nous terminerons par mentionner les propriétés caractéristiques de la solution proposée. Certains éléments de nos applications robotiques seront également introduits ponctuellement dans ce chapitre, comme complément au modèle présenté.

## 8.2 L'architecture cognitive

### 8.2.1 Sa fonction

Nous pouvons résumer la fonction du niveau cognitif à un choix continu des instincts de l'agent, en vue d'assurer une fonctionnalisation adéquate de son activité<sup>1</sup>. Les ensembles  $\mathcal{S}$ ,  $\mathcal{I}$  et l'application  $\mathcal{F}$  étant les éléments du formalisme comportemental introduit au chapitre 7, la figure 8.1 illustre ce principe.

Le niveau comportemental fournit l'état sensoriel (élément de  $p(\mathcal{S})$ ) qui, par application de la fonction de stimulation  $\mathcal{F}$ , permet de déterminer l'état de stimulation courant (élément de  $p(\mathcal{I})$ ). Le bloc *choix* a pour fonction de sélectionner l'un des instincts stimulés (élément de  $\mathcal{I}$ ).

Ce choix peut être purement aléatoire ou se baser sur une connaissance et des capacités cognitives permettant à l'agent de fonctionnaliser son activité. Dans le premier cas, l'agent est uniquement situé; il sera guidé par l'environnement et ne présentera, aux yeux de l'observateur,

<sup>1</sup>Rappelons que la capacité de fonctionnalisation correspond à l'exploitation contextuelle et systématique des propriétés d'action en vue de satisfaire les critères d'évaluation ([survie], [rôle social] et [évolution]). L'autonomie est alors dépendante d'une fonctionnalisation adéquate de l'activité.

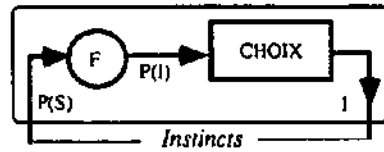


Figure 8.1 : Vue fonctionnelle du niveau cognitif.

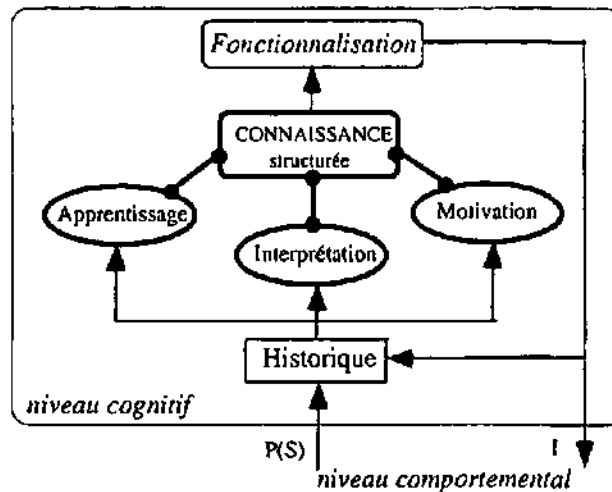


Figure 8.2 : Architecture cognitive de l'agent.

aucune stabilité et aucune régularité comportementale. Dans le second cas, celui que nous développons ici, l'agent se dirige dans l'espoir de satisfaire les critères d'évaluation que nous avons considérés; la capacité de préserver seul son intégrité physique et énergétique [survie], de satisfaire seul les tâches attribuées par son concepteur [rôle social] et d'améliorer ses aptitudes au cours du temps [évolution].

### 8.2.2 Sa structure

La figure 8.2 représente l'architecture cognitive que nous avons développée. Elle est composée d'une structure intermédiaire (l'historique), de trois processus cognitifs (l'interprétation, l'apprentissage et la motivation) et d'une connaissance centrale. La capacité de fonctionnalisation est également représentée. Elle résulte de la collaboration des trois processus cognitifs.

La succession des états sensoriels annoncés par le niveau comportemental constitue la seule entrée du niveau cognitif. La sortie correspond à l'identification des instincts successivement sélectionnés par ce niveau cognitif.

L'historique est une représentation directe de l'interaction sensori-motrice que l'agent maintient avec son milieu. Cette connaissance primaire est structurée par les processus cognitifs pour aboutir à une connaissance favorisant la capacité de fonctionnalisation (voir figure 8.2).

Les trois processus cognitifs s'articulent autour de cette connaissance structurée en vue de faciliter une fonctionnalisation adéquate. Ils sont le lien entre l'historique et la connaissance structurée. En revanche, la fonctionnalisation se contente de contrôler l'activité de l'agent en fonction uniquement de l'état de la connaissance.

### 8.3 La connaissance: introduction

Nous abordons le thème de la connaissance du niveau cognitif de l'architecture ARCO.

Dans un premier temps, nous différencions conceptuellement plusieurs niveaux de cognition et précisons l'ambivalence objectivisme-subjectivisme que nous pensons être au centre du débat et que nous n'avons qu'effleurée jusqu'ici. Cette première partie introduit le cadre épistémologique dans lequel nous nous plaçons et la terminologie qui sera utilisée par la suite.

Nous précisons également ce que nous considérons être une connaissance adéquate pour un agent autonome. En particulier, nous développons les trois sujets essentiels de l'*objet*, du *rôle* et de la *nature* de la connaissance.

A partir de cette thèse, nous exposons la problématique rencontrée dans notre travail de modélisation et les solutions apportées par notre modèle.

Enfin, nous soulevons trois propriétés des représentations proposées. Elles permettent de montrer que les solutions apportées s'inscrivent bien dans le cadre de la position adoptée.

### 8.4 Concepts et terminologie

#### 8.4.1 Cognition de bas niveau et cognition de haut niveau

Par opposition à une conception innéiste de l'être qui considérerait la nature de celui-ci comme le résultat d'une détermination complète des capacités individuelles à partir du patrimoine génétique, l'*approche constructiviste* avance que cette nature est façonnée par un développement ontogénétique qui s'alimente de l'interaction que maintient le sujet avec son milieu. Dans ce cadre, la cognition est la conjonction d'une connaissance et des mécanismes qui la structurent à travers des phases de complexité et d'organisation croissantes.

Les étapes de cette évolution ont été exprimées dans les travaux de Jean Piaget; d'une connaissance sensori-motrice du nouveau né aux opérations formelles de l'adolescent, en passant par l'étape intuitive et l'étape des opérations concrètes à différents stades de l'enfance. Piaget a également décrit les mécanismes permettant d'expliquer ces évolutions cognitives; il parle d'*accommodation* et d'*assimilation*<sup>2</sup>, ainsi que de *centration* et de *décentration*<sup>3</sup>.

Ainsi, le processus de développement passe à travers différents stades de cognition. Dans notre travail, nous différencions deux niveaux de cognition que nous nommons "cognition de bas niveau" et "cognition de haut niveau". Elles correspondent au point de départ et d'arrivée de la connaissance de notre agent à travers un processus de structuration. Dans notre architecture cognitive, ils apparaissent sous la forme d'un historique et d'une connaissance structurée.

Ainsi, ce que nous considérons être une *cognition de bas niveau* englobe une succession d'informations sensori-motrices et les mécanismes propres au sujet qui permettent la gestion de cette connaissance primaire. A ce niveau, aucune connaissance structurée n'apparaît.

En revanche, la cognition de haut niveau englobe le résultat d'une structuration de cette connaissance primaire et les mécanismes permettant cette structuration. A ce niveau, on peut imaginer une structuration passive qui correspondrait à l'organisation des connaissances dans

---

<sup>2</sup>L'*accommodation* est définie comme un processus adaptatif grâce auquel un organisme peut supporter les modifications du milieu extérieur. L'*assimilation* correspond à une conduite active par laquelle le sujet modifie le milieu au lieu de s'en accommoder. Dans la théorie de Piaget, il s'agit de l'application d'un schème d'action pour passer d'une situation à une autre. L'exemple donné est celui du bébé qui découvre qu'un objet peut être mu par un cordon (schème) et qui tire sur la nappe pour s'emparer d'un jouet (assimilation).

<sup>3</sup>La *centration*, toujours dans la théorie de Piaget, désigne la prise en compte par le sujet d'un seul aspect d'une situation ou d'une configuration perceptive. Cette fixation perceptive se fait au détriment des informations qui permettent d'appréhender les divers aspects de la situation et d'assurer leur coordination. La centration s'applique également à l'adhésion du sujet à son propre point de vue, ce qui l'empêche de saisir le point de vue de l'autre. La *décentration* en revanche correspond à une phase où le sujet commence à imaginer à quoi ressemblent les choses sous des points de vue différents. Elle correspond à s'extraire d'une attitude égocentrique.

le but de maintenir une cohérence interne (aptitude ressemblant à une accommodation) et une structuration active à travers une action intentionnelle inspirée de la connaissance structurée et motivée par un accroissement de l'organisation interne (aptitudes proches de l'assimilation et de la décentration).

## 8.4.2 Représentations objectivistes et non-objectivistes

Les systèmes à base de connaissances abordés en l'IA, en particulier par le courant cognitiviste, contiennent essentiellement des connaissances qui décrivent les objets du monde, les faits et propriétés concernant ces objets, des éléments de savoir-faire (règles) ou des méta-connaissances. Elles sont censées être le miroir de la "réalité" et fournir un isomorphisme<sup>4</sup> entre le représentant (le symbole, la forme) et le représenté (l'objet, le contenu).

De plus, ces connaissances sont données par le concepteur du système. Elles correspondent donc à un point de vue externe au système sur un certain domaine d'activité ou d'expertise. Par ce fait, les informations entrant dans le système sont pré-catégorisées selon une interprétation élaborée et donnée par le concepteur.

Cette approche de la représentation est dite *objectiviste*; une entrée particulière permettra par exemple au système de déclarer directement "grenouille". Le contenu est clair ("à nos yeux"), mais externe au système.

Face à l'approche objectiviste, certains auteurs<sup>5</sup> ont préconisé une approche de l'intérieur du système que l'on peut qualifier de non-objectiviste.

Dans ce cas, les entrées du système sont non-catégorisées; c'est au système de les interpréter, de les classer en un tout cohérent. C'est donc le système lui-même qui structure les informations reçues et élabore ainsi sa connaissance. Ce choix méthodologique s'accompagne de procédés d'acquisition.

Enfin, les structures extraites ne sont pas censées correspondre à des objets du monde physique; ce sont, au contraire, des éléments de sensations vécues. Leur contenu est flou ("à nos yeux"), mais interne au système.

Dans notre travail, nous éviterons le terme *subjectivisme* pour nous référer à l'approche non-objectiviste<sup>6</sup>.

## 8.5 Position adoptée

### 8.5.1 Approche non-objectiviste et cognition de bas niveau

Dans ce travail, nous avons adopté un point de vue non-objectiviste face au problème du choix de la connaissance adéquate pour un agent autonome. Cette position est contraire à celle rencontrée traditionnellement en IA. Notre propos est de développer en quoi nous considérons que cette approche est judicieuse par rapport à l'autonomie et de valider notre approche à travers des exemples concrets<sup>7</sup>.

De fait, l'approche non-objectiviste s'allie de façon naturelle à notre choix de synthèse dans le cadre de l'architecture ARCO. C'est une approche synthétique de la représentation; de bas

<sup>4</sup> Holland a réduit la contrainte et travaille à l'obtention d'un homomorphisme (voir [Holland-al.86b]).

<sup>5</sup> Voir [Watzlawick78] ou [Booth-Stewart93], par exemple.

<sup>6</sup> Le choix du terme *subjectivisme* pourrait paraître naturel dans le cadre de l'IA. Il se trouve pourtant que cette terminologie hérite d'une longue tradition de débats et de controverses dans le cadre des sciences cognitives; en particulier, ce domaine tend à associer le subjectivisme à une négation de l'existence d'un monde extérieur (idéalisme, solipsisme). Dès lors, il nous paraît important, afin d'éviter cette association, de préciser que notre approche ne considère pas la question ontologique de l'existence du monde externe. Notre intérêt porte essentiellement sur la nature de la connaissance et les moyens d'y accéder.

<sup>7</sup> Ce choix nous poussera, dans la suite du texte, à utiliser avec attention des termes tels que réalité, monde (réel) ou fait (réel). La plupart du temps, nous les remplacerons par environnement, milieu, événement, facteur externe ou stimulus distal.

## 8. Le niveau cognitif

en haut, à travers les abstractions successives du signal, de la sensation, du vécu sensori-moteur et de la connaissance structurée.

Dans le cadre des architectures hybrides dans lequel nous nous situons, voulant allier action et raisonnement dans la modélisation d'un agent autonome, l'attitude non-objectiviste caractérise notre étude de la connaissance<sup>8</sup>.

Nous verrons que, non seulement cette approche non-objectiviste permet (comme l'approche objectiviste) d'aboutir à la dimension délibérative de l'autonomie (par le raisonnement), mais elle apporte une nouvelle méthodologie qui, à travers la connaissance, permet d'associer la réactivité à cette dimension délibérative.

Enfin, sous l'hypothèse de l'existence de différents niveaux de cognition, les représentations de l'approche objectiviste conduisent directement à une cognition de haut niveau, alors que celles de l'approche non-objectiviste correspondent d'abord à une cognition de bas niveau. Elles s'inscrivent toutefois dans la perspective à long terme d'aboutir, par structurations successives, à une cognition de haut niveau.

Dès lors, précisons que, bien que l'approche non-objectiviste s'inscrive dans une perspective d'ascension à travers les niveaux de cognition afin d'aboutir, à long terme, à la notion d'objet, notre travail n'aborde que les premières étapes de ce cheminement (suffisantes pour le degré d'autonomie convoité), la perspective de l'objet dépassant largement le cadre de cette thèse.

### 8.5.2 Une approche synthétique de la connaissance

C'est dans la continuité de notre adhésion à une méthodologie non-objectiviste que s'inscrivent nos réponses aux questions de l'objet, du rôle et de la nature de la connaissance.

La synthèse est la méthode qui va du simple au composé. Dans le cadre de l'architecture ARCO, c'est l'approche que nous prenons par le choix d'une connaissance (au niveau cognitif) basée exclusivement sur les capacités comportementales sous-jacentes.

Nous allons aborder les trois questions suivantes:

1. Sur quoi la connaissance de l'agent cognitif porte-t-elle?
2. Quel est le rôle de cette connaissance?
3. Enfin, quelle est la nature de cette connaissance?

1. L'agent évolue dans un environnement externe à lui-même. Il n'y a aucun accès, si ce n'est à travers ses *sens* et ses *actions*.

Les sens lui fournissent continuellement une image de son environnement. C'est de là qu'il construit sa réalité subjective. L'action lui permet d'intervenir dans l'environnement et de modifier ainsi l'image reçue. C'est par l'action et la perception que l'agent *dialogue* avec l'environnement. Ce dialogue forme l'interaction milieu-agent (*interaction* dans la suite).

Encore une fois, au lieu de vouloir représenter de façon "adéquate" un "monde" extérieur, objectif et prédéterminé, notre approche est plus empirique; l'agent prend comme référent, non pas son partenaire de dialogue, mais le dialogue lui-même, l'interaction. Elle est, à notre sens, l'ultime frontière que l'agent puisse traiter, la dernière qu'il puisse maîtriser. C'est donc sur l'*expression des régularités de l'interaction* que l'agent va fonder sa connaissance de base autour de laquelle s'articuleront les processus structureurs (processus cognitifs).

---

<sup>8</sup>Dans le cercle encore restreint des travaux de l'approche hybride, à notre connaissance, seule Maja Mataric tend à intégrer une attitude non-objectiviste dans la problématique de modélisation complète d'un agent autonome (voir chapitre 4). Malheureusement, l'adhésion au non-objectivisme n'est que partielle dans le sens où elle s'arrange (en tant que conceptrice) pour que la représentation extraite soit "une carte topologique de l'environnement", qui lui fournisse un "isomorphisme entre le monde et la carte". Quoi qu'il en soit, nous pensons que notre travail s'inscrit dans un cadre conceptuel différent et, par ce fait, possède la particularité de susciter une problématique différente.

2. Cette connaissance des régularités va permettre à l'agent de *prédire* les effets de ses actions et favoriser ainsi son autonomie à travers une fonctionnalisation adéquate de son activité. La connaissance sert à anticiper, si possible à long terme.

3. Enfin, plusieurs types de représentations sont possibles. Nous étudions, pour notre part, une connaissance de nature *sensori-motrice*. En effet, c'est à travers ses actions et ses sens que l'agent établit, maintient et "vit" l'interaction. Sa connaissance est ancrée sur les données internes élémentaires des sens et de l'action qui forment son unique "réalité".

Cette approche partage les préoccupations de certains travaux qui n'envisagent l'agent que comme un être plongé dans son environnement et modélisent l'autonomie d'un point de vue interne au système (voir [Maturana-Varela87], [Bourguine-Varela91], [Schwartz92]).

## 8.6 La problématique abordée

Dans le cadre des contraintes introduites par ces choix méthodologiques, contraintes qui viennent s'ajouter à celles liées à l'architecture ARCO, il s'agit d'aborder la problématique de la mise en pratique de notre approche.

Plusieurs questions apparaissent. Elles portent sur la nature, l'expression et les liaisons existantes entre l'interaction, la capacité de fonctionnalisation de l'activité, la capacité de structuration de la connaissance et la connaissance elle-même en tant que fruit de cette structuration.

En ce qui concerne l'interaction, nous sommes poussés à étudier trois questions:

- Quelle est la forme de l'interaction sensori-motrice?
- Comment l'exprimer, par quel formalisme?
- Quelle peut être la nature de sa représentation dans une perspective de structuration (symbolique, sub-symbolique, supra-symbolique, implicite, explicite, centralisée, distribuée)?

Par rapport à la fonctionnalisation, deux questions se posent:

- Quels éléments de connaissance poussent l'agent à remettre en question le choix de son activité?
- Sur quelle notion de stabilité peut s'appuyer la fonctionnalisation?

La troisième problématique porte sur les propriétés nécessaires à la structuration des connaissances. Il s'agit de déterminer:

- Sur quels types de régularités de l'interaction la structuration va-t-elle se fonder?
- Quels traitements sont nécessaires à une telle structuration?

Enfin, par rapport à la connaissance, résultat de cette structuration, deux questions se posent:

- Quel niveau de connaissance, quel degré de structuration, suffit à envisager l'autonomie telle que nous l'avons abordée (satisfaction par l'agent des critères d'évaluation [survie], [rôle social] et [évolution], à travers une fonctionnalisation adéquate de son activité)?
- Sur quoi porte cette connaissance structurée? Porte-t-elle toujours sur l'interaction ou devient-elle une représentation de l'environnement?

Le prochain paragraphe présente un modèle de la connaissance par lequel nous essayons d'apporter des solutions à cette problématique. Il traite de la connaissance à des niveaux différents. La structuration elle-même sera développée au chapitre suivant, lorsque nous décrirons les processus cognitifs (en particulier, l'interprétation et l'apprentissage).

## 8.7 Solutions apportées

Nous allons établir et spécifier deux niveaux de connaissance; celui de l'interaction telle qu'elle est vécue par l'agent et celui de la connaissance (interaction structurée) sur laquelle s'appuieront les mécanismes de fonctionnalisation de l'activité. Ils correspondent aux deux niveaux de cognition dont nous parlions au paragraphe 8.4.1.

### 8.7.1 Le vécu sensori-moteur comme unique réalité

Au départ, notre agent ne possède aucune connaissance sur laquelle articuler ses processus cognitifs. Il est uniquement doté de certaines capacités comportementales à travers les instincts que nous programmons. La spécification de ces capacités comportementales lui est donnée à travers la fonction de stimulation  $\mathcal{F}$  (permettant de savoir quels instincts sont stimulés dans un état sensoriel observé). C'est sur cette base que doit être abordée la problématique liée à l'interaction sensori-motrice.

Nous allons expliciter et justifier les hypothèses sur lesquelles repose notre approche de l'interaction. Ensuite, nous proposerons une formalisation de cette interaction.

#### Hypothèses retenues

Les hypothèses que nous considérons dans notre approche de l'interaction milieu-agent portent sur la *variation sensorielle* et l'origine des *remises en question* des choix de l'activité. Elles s'expriment de la façon suivante:

- Hyp.1: La réalisation effective d'un instinct, dans le contexte d'un état sensoriel particulier, aboutit irrémédiablement à une variation de l'état sensoriel observé.
- Hyp.2: Le choix effectif d'un instinct n'intervient ou n'est provoqué que par une variation de l'état sensoriel observé.

La première hypothèse affirme que l'activité (physique ou mentale) perturbe, tôt ou tard, l'état sensoriel observé. Intuitivement et statistiquement, la durée, en temps absolu, séparant deux états sensoriels différents et successifs est d'autant plus courte que l'espace sensoriel  $\rho(\mathcal{S})$  est riche ( $\mathcal{S}$  étant l'ensemble des stimuli).

Remarquons que cette hypothèse ne signifie en aucun cas que seule l'action de l'agent peut provoquer une modification de l'état sensoriel observé par celui-ci. D'autres facteurs peuvent intervenir tels que le bruit (lié aux capteurs), les mouvements propres à l'environnement, les actions d'autres agents dans cet environnement, ou même les facteurs internes à l'agent (intéroception).

La deuxième hypothèse désigne la variation sensorielle comme l'élément déclencheur du processus de décision. Cette approche est liée à la notion de "dépression nerveuse" (*breakdown* en anglais) qui apparaît chez différents auteurs en IA [Suchman87, Chapman-Agre86, Winograd-Flores87]. Un *breakdown* est une sorte d'événement cognitif caractérisé par un état de surprise, d'incertitude ou d'appréhension (voir [Bersini94b]). Il aboutit, d'après Bersini, au passage d'une activité "sous-cognitive" (de nature inconsciente), où l'individu agit de façon quasi-automatique, à une activité cognitive (le raisonnement conscient)<sup>9</sup>.

Dans le cadre de l'interaction milieu-agent que nous modélisons, dont l'historique est la trace, la variation sensorielle constitue notre source de *breakdowns*. C'est l'observation d'une

<sup>9</sup>Bersini a récemment reconsidéré ce concept; il extrait six catégories de *breakdowns* dont quatre sont traités en simulation: le *no-script* (absence d'automatismes connus pour résoudre un problème), le *multiple-path* (plusieurs solutions sont offertes, il faut se décider), la *sequence-obstruction* (l'impossibilité de réaliser un but bloque la réalisation de la tâche), l'*expectation-failure* (proche du précédent), l'*absolute-surprise* (par exemple et toujours d'après Bersini, un passage érotique dans un traité de logique modale!) enfin l'*anticipated-risk* (correspondant à une appréhension subite). [Bersini91b]

telle variation qui déclenchera un cycle de la boucle cognitive et, par conséquent, un cycle de la boucle de fonctionnalisation.

Ainsi, notre formulation de l'historique découlera de la notion du *breakdown*; seul un changement observé nécessite une reconsidération de la situation et une nouvelle décision. Tant que l'état observé reste identique, le dernier choix réalisé reste valable. A la limite, si le processus de choix (fonctionnalisation) était reconduit, la même décision serait prise puisqu'aucun changement, aucune information nouvelle, n'a permis de faire évoluer la connaissance sur laquelle le dernier choix a été réalisé.

Enfin, comme conséquence des deux hypothèses réunies, seule la variation sensorielle engendre la dimension temporelle du système; c'est l'observation du changement qui fait passer le système d'un point de choix à l'autre, d'un instant sensoriel à l'autre. La durée absolue de l'état sensoriel n'intervient pas dans notre traitement; pour l'agent, l'intervalle temporel devient instant. C'est ce qui justifie notre choix du terme *instant* dans "instant sensoriel".

Cette démarche rejoint dans l'essentiel la remarque de Yoav Shoham dont les premières phrases de son livre intitulé "*Reasoning about Change*" déclarent:

*"Of course, the passage of time is important only because changes are possible. In a world where no changes were possible - no viruses infecting blood systems, no electrical charges changing, no changes in program counters, not even changes in the position of the sun in the sky or the position of the hands on our wrist-watches - not only would there be no computational justification for keeping track of time, but the very concept of time would become meaningless". [Shoham88].*

## Formalisation de l'interaction

Le vécu sensori-moteur de l'agent, tout au long de son cheminement, constitue sa source de connaissance (cognition de bas niveau). C'est de son dialogue continu avec le milieu que l'agent extrait, de façon naturelle et synchronique<sup>10</sup>, son historique sensori-moteur.

En considérant les deux hypothèses précédentes, l'historique devient une séquence alternée d'états sensoriels observés et d'instincts sélectionnés. Grâce au formalisme comportemental introduit au chapitre 7, l'historique en un instant sensoriel  $t$  peut être exprimé par:

$$H(t) = [p(1)i(1)p(2)i(2)p(3) \dots p(t-1)i(t-1)p(t)], p(j) \in \mathcal{P}(\mathcal{S}), i(j) \in \mathcal{I}$$

Chaque  $p(j)$  est l'état sensoriel observé à l'instant sensoriel  $j$ . De même, chaque  $i(j)$  est l'instinct sélectionné et donc réalisé à l'instant sensoriel  $j$ . La valeur  $t$  désigne l'instant sensoriel courant. De plus, l'historique se plie à deux contraintes:

- $p(j) \neq p(j+1), \forall j \geq 1$ , (deux états sensoriels successifs sont forcément différents)
- $i(j) \in \mathcal{F}(p(j)), \forall j \geq 1$ , (à chaque instant sensoriel, l'instinct sélectionné est forcément stimulé)

La première contrainte découle directement des hypothèses du paragraphe précédent, alors que la seconde est une conséquence de la définition même du problème de la sélection d'actions; on ne peut choisir que parmi les instincts qui sont prêts à s'exprimer en action, ceux qui sont stimulés.

Ainsi, cette connaissance sensori-motrice est la seule source d'information de notre agent, son "unique réalité". Elle possède la particularité de conjuguer deux propriétés qui généralement semblent contradictoires: représenter des capacités sensori-motrices et être de nature symbolique.

La connaissance de base étant établie, le paragraphe suivant introduit une connaissance de plus haut niveau, qui doit être l'aboutissement du processus de structuration.

<sup>10</sup> *Synchronique*: Qui représente ou étudie des faits arrivés en même temps.

## 8. Le niveau cognitif

Il est important de préciser que les structures que nous allons proposer dans la suite de ce chapitre correspondent à celles envisagées comme résultat d'un processus de structuration de l'historique. Nous délaissions momentanément les mécanismes de structuration pour ne nous intéresser qu'au produit final, la connaissance structurée. Dans ce cadre, nous nous permettons d'adopter une position objectiviste en proposant des illustrations qui ne sont que notre vision de ce que pourrait être la connaissance de l'agent après structuration "parfaite" de son historique "parfait". Il s'agira ensuite (à travers la spécification des processus cognitifs) de s'assurer que le passage de l'un à l'autre peut être réalisé par l'agent, de façon autonome et suivant une approche cette fois non-objectiviste et constructiviste.

### 8.7.2 Représentation de la topologie de l'interaction

L'historique sensori-moteur constitue une connaissance linéaire de l'interaction milieu-agent, une succession d'expériences vécues. Cette connaissance est peu structurée. Or, les capacités cognitives que nous convoitons dans le but de permettre une fonctionnalisation de l'activité (particulièrement la localisation et la prédiction) nécessitent une connaissance plus structurée de l'interaction donnant, notamment, des informations sur son organisation globale; sur sa structure topologique plus que sur sa structure temporelle (uni-dimensionnelle)<sup>11</sup>.

#### Une structure de graphe

Le type de structure symbolique que nous considérons pour représenter la topologie de l'interaction est la structure de graphe.

Nous allons exposer brièvement les possibilités de représentation d'une telle structure de graphe et proposer celle que nous avons choisie dans notre travail.

Deux approches sont possibles pour représenter un graphe de façon symbolique: les graphes implicites et les graphes explicites. Pour les différencier, il suffit de ne pas confondre la description du graphe et le graphe physique lui-même, auquel cette description correspond.

Selon une formulation mathématique, un graphe  $G$  peut se définir par un couple  $G = (X, U)$ , où  $X = \{x_k\}$  correspond à l'ensemble des sommets  $x_k$  du graphe et  $U = \{(x_i, x_j)\}$  la famille<sup>12</sup> des couples de sommets  $(x_i, x_j)$  représentant les arcs du graphe. Le graphe correspondant peut être construit en créant une structure informatique (une instance, par exemple) pour chacun des sommets et en les connectant les uns aux autres suivant la définition des arcs donnée par  $U$ .

L'approche par graphe implicite correspond à donner uniquement une description du graphe. Dans ce cas, une modification du graphe correspond à l'ajout ou au retrait d'un élément de la description. Si cela est nécessaire, la description peut servir à construire le graphe explicite grâce à un générateur de graphes. Enfin, cette solution est économique en taille mémoire allouée. Le prix à payer est le temps de calcul nécessaire au générateur de graphe chaque fois qu'une reconstitution est nécessaire<sup>13</sup>.

L'approche par graphe explicite correspond à donner explicitement le graphe construit. Une modification du graphe correspond à l'ajout ou au retrait d'une structure informatique. Aucun générateur n'est nécessaire. Le prix à payer est la taille mémoire devant être allouée.

Suivant l'emploi que l'on fait du graphe, l'une ou l'autre des possibilités s'impose. Lorsqu'il s'agit uniquement de remettre à jour régulièrement et de façon importante la structure du

<sup>11</sup>Pour ce qui est de l'Homme, et avec nous certainement une d'une grande partie des animaux, percevoir l'espace qui nous entoure, se représenter certains contextes et surtout l'agencement des contextes les uns par rapport aux autres, sont des fonctions vitales dont nous nous servons tous les jours. Il semble que nous soyons naturellement amenés à structurer les éléments de notre vécu.

<sup>12</sup>Plusieurs arcs pouvant exister entre deux mêmes sommets, on parle de famille car les mêmes couples  $\{x_i, x_j\}$  peuvent apparaître plusieurs fois dans  $U$ .

<sup>13</sup>La représentation utilisée par Drescher (sous la forme de schèmes, voir chapitre 4) correspond à un exemple de graphe implicite; seul un ensemble de schèmes est donné. Il s'agit d'une description morceau par morceau du graphe de l'espace sensori-moteur d'un individu, qui peut être reconstruit à tout instant.

## Modélisation d'un agent autonome

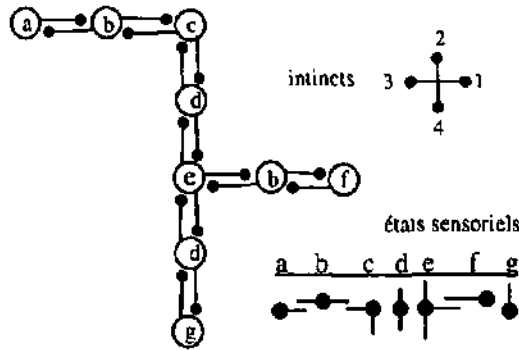


Figure 8.3 : Représentation symbolique de la topologie de l'interaction sensori-motrice milieu-agent.

graphe, il suffit de travailler sur la description (espace mémoire réduit et pas de génération). Par contre, si le graphe porte un traitement lourd (passage d'informations de sommet en sommet, traitements locaux sur un certain voisinage des sommets) et sa structure est suffisamment stable, le graphe explicite est plus adapté (traitement local simplifié, pas de génération lourde).

Nos traitements s'inscrivent dans cette deuxième approche et demandent donc une solution par graphe explicite.

### Contextes et transitions contextuelles

Dans la structure de graphe que nous allons utiliser, les sommets correspondent à la notion de *contexte* et les arcs à la notion de *transition contextuelle*.

Nous avons déjà rencontré le terme "situé" lorsque nous avons introduit, au chapitre 3, la notion d'action située. Dans ce cas, le terme signifie "en situation", dans un état précis et à un moment précis. Nous définissons la *situation* comme un état ponctuel, local dans l'espace et dans le temps. Par exemple, l'observation d'un état sensoriel constitue une situation particulière pour l'agent.

Pour l'instant, nous dirons simplement que la notion de *contexte* se veut plus large que celle de situation. Elle l'englobe et peut se résumer à elle.

La notion de *transition contextuelle* correspond simplement au passage d'un contexte observé à un autre.

En reprenant l'exemple traité au chapitre 7 (environnement en forme de 7 et quatre instincts de suivi de corridors), la figure 8.3 donne un graphe planaire permettant d'illustrer le genre de représentation que nous proposons. Les sommets contiennent les différents états sensoriels observés (situations) et les arcs sont étiquetés par l'instinct produisant la transition<sup>14</sup>.

Cette représentation contient des informations utiles sur la topologie de l'espace sensori-moteur. Le passage entre la connaissance linéaire de l'historique et ce graphe représente un saut qualitatif important, dans une perspective d'autonomie. Malheureusement, d'un point de vue algorithmique, cette représentation ne peut être extraite et manipulée par l'agent de façon efficace<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> Précisons que, bien que l'allure globale du graphe rappelle celle de l'environnement, le graphe ne représente pas directement cet environnement mais plutôt l'interaction milieu-agent dans cet environnement particulier (telle que nous la voyons projetée dans l'espace sensori-moteur de l'agent). La même structure pourrait apparaître sous une autre disposition et ne présenter aucune analogie avec la forme de l'environnement. Nous reviendrons sur cet aspect au paragraphe 8.8.1.

<sup>15</sup> Le problème de la synthèse d'un tel graphe à partir de l'historique est calculable en théorie mais impraticable d'un point de vue algorithmique (voir [Gingsburg62] pour une théorie des machines séquentielles abordant le problème de la synthèse).

## 8. Le niveau cognitif

Il s'agit de déterminer quelle représentation peut à la fois être utile à la fonctionnalisation et adéquate à une structuration efficace. Pour cela, nous allons analyser deux propriétés de ces graphes qui sont essentielles à leur gestion. Elles nous mèneront à proposer une définition plus précise de la notion de contexte et à obtenir le genre de représentation convoitée.

### 8.7.3 Déterminisme et ambiguïté

Deux propriétés du graphe sont importantes par rapport aux capacités de prédiction et de localisation nécessaires à la fonctionnalisation de l'activité: ce sont, respectivement, le déterminisme et l'ambiguïté.

Le graphe de la figure 8.3 est *déterministe* car, pour tout choix d'instinct dans une situation donnée, il établit, de façon univoque, la transition correspondante. Un graphe non-déterministe fournirait, pour une situation donnée et pour un choix particulier d'instinct, plusieurs destinations (effets) possibles.

Par contre, le graphe est *ambigu* car plusieurs sommets possèdent le même contenu sensoriel. En effet, plusieurs zones de l'environnement conduisent à l'observation du même état sensoriel par l'agent qui, dans ces cas et en supposant qu'il ait ce graphe comme représentation de son interaction, ne peut pas savoir dans quel sommet (situation) il se trouve.

Le déterminisme et la non-ambiguïté sont souhaitables pour faciliter une fonctionnalisation adéquate. Nous allons traiter le cas de la non-ambiguïté, qui est le plus difficile à maîtriser.

### Non-ambiguïté par enrichissement des contextes

L'approche classique au problème de l'ambiguïté, particulièrement dans des applications robotiques, est d'enrichir l'espace sensoriel.

Cette approche se base généralement sur des explications du genre "si nous nous trouvons au même endroit que le robot lorsqu'il observe un état ambigu, nous sommes capables, en raison de la richesse de notre appareil sensoriel, de distinguer les différents contextes". Cette approche aboutit à l'ajout de nouveaux capteurs sur le robot et au traitement de nouvelles caractéristiques par un ensemble d'instincts ajoutés ou re-programmés. Ceci a pour conséquence d'enrichir l'espace sensoriel de l'agent<sup>16</sup> et d'accroître sa capacité de discrimination. Or, fatalement, la taille de la représentation, en nombre de sommets et pour un même environnement, tendra à croître également de façon exponentielle avec le nombre de nouvelles capacités introduites<sup>17</sup>.

Par opposition à cette tendance courante d'enrichissement des capacités physiques et comportementales de l'agent, nous affrontons, pour la seconde fois, les contraintes propres de notre approche synthétique dans l'architecture ARCO; il nous faut, étant donné un agent comportemental à capacités limitées, résoudre le problème de l'ambiguïté sans toucher aux niveaux inférieurs de l'architecture. Il s'agit d'exploiter, malgré ses limitations, l'agent comportemental particulier que nous avons à disposition.

La solution que nous proposons consiste à enrichir le contenu du contexte; il s'agit de prendre pour contexte non pas un état sensoriel (une situation) mais l'*état sensoriel et son voisinage sensori-moteur*. La prise en compte du voisinage doit permettre de distinguer des contextes ambigus. La figure 8.3 permet de comprendre cette approche; les contextes ambigus (d'état sensoriel *b* ou *d*) sont différenciables si l'on considère leur voisinage immédiat.

<sup>16</sup>La taille de l'espace sensoriel possible  $\rho(S)$  passe de  $2^m$  à  $2^{m+r}$ , avec  $m = |S|$  et  $r$  étant le nombre de caractéristiques sensorielles ajoutées.

<sup>17</sup>L'agent ne se déplace plus dans un hypercube de dimension  $m$  (à  $2^m$  sommets, avec  $m = |S|$ ) mais dans un hypercube de dimension  $m + r$  (à  $2^{m+r}$  sommets).

## Forme du voisinage considéré

Différents types de voisinages sont envisageables. Le plus général, le voisinage complet ou "en étoile" de taille  $n$ , peut être parcouru par l'agent en visitant successivement toutes les branches possibles à partir du sommet courant jusqu'à une profondeur  $n$  que l'on nomme *taille de traitement*.

Malheureusement, ce traitement nécessite un retour en arrière (*backtracking*) pour chaque nouvelle branche à parcourir. Or, l'agent n'en est pas forcément capable; dans notre exemple, l'agent n'est pas censé savoir que l'instinct "suivi du lien vers le Nord" est l'inverse du "suivi du lien vers le Sud" et que la séquence de ces deux instincts doit lui permettre de revenir au contexte d'origine.

En outre, même si cette connaissance lui était donnée, les perturbations pouvant intervenir durant cette exploration rendraient difficile le parcours exhaustif d'un voisinage complet de taille supérieure à 1.

## Sens de parcours du voisinage

Un traitement plus naturel et direct est néanmoins possible; il s'agit de considérer un voisinage parcouru uniquement "en avant", sans retour en arrière. Malheureusement, cette technique ne fait apparaître la non-ambiguïté qu'a posteriori ("on était dans cet état  $x$  et pas un autre").

Or, si ce voisinage est considéré non pas vers l'avant mais vers l'arrière et à l'instant présent, l'information du contexte est directement extractible de l'historique, du passé sensori-moteur que l'agent "a sous la main". La désambiguïté est alors naturelle et instantanée. Dans l'exemple de la figure 8.3, pour parvenir à l'un des sommets d'état sensoriel  $b$ , il faut forcément avoir suivi l'une des branches possibles de longueur 1 qui permet de le différencier. La technique de désambiguïté naturelle est ainsi trouvée: l'agent peut reconnaître les contextes instantanément<sup>18</sup>.

## Un sommet, une séquence sensori-motrice, un contexte

Ainsi, nous avons généralisé la notion de contexte. Elle devient une séquence sensori-motrice de taille donnée (la taille de traitement), tirée instantanément de l'historique et débutant et terminant par un état sensoriel. La notion de situation apparaît dès lors comme un cas particulier de contexte où la taille de traitement vaut 0.

Au niveau de la représentation par graphe, cette nouvelle définition nous pousse à reconsidérer la nature du contenu des sommets, dans le but de réduire l'ambiguïté:

- chaque sommet correspond à une sous-séquence unique et de longueur fixe, tirée de l'historique, débutant et terminant par un état sensoriel (contexte),
- les arcs orientés (instincts) représentent des transitions entre contextes (transitions contextuelles).

La figure 8.4 représente le graphe ("objectif" ou "optimal" à nos yeux), pour un voisinage de taille 1 (séquences de longueur 3), correspondant à l'environnement test<sup>19</sup>. Le contexte  $a|b$  signifie "je suis dans l'état sensoriel  $b$  provenant de l'état sensoriel  $a$ , à travers l'instinct 1".

Dans ce cas, le fait de considérer des contextes de taille 1 suffit à éliminer l'ambiguïté, tout en conservant le déterminisme de l'effet lié aux choix des instincts.

<sup>18</sup>Remarquons l'analogie entre le problème de la désambiguïté et la notion d'abduction introduite au paragraphe 3.8.3; toutes deux aspirent à réduire l'espace d'interprétations possibles. Dans la théorie de la communication, cela correspond à une réduction de l'entropie (ou degré d'incertitude) du système.

<sup>19</sup>Par souci de clarté, chaque arc bidirectionnel remplace deux arcs orientés. Les arcs sont implicitement étiquetés par l'instinct contenu dans le contexte du sommet destination.

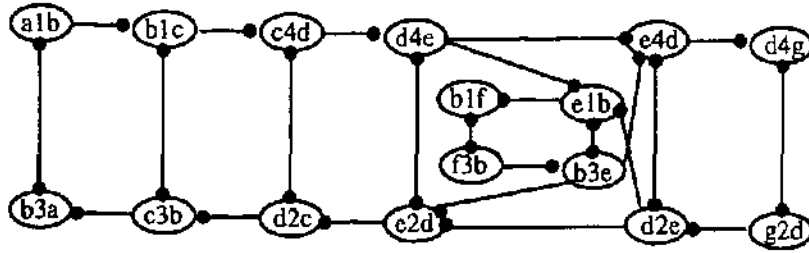


Figure 8.4 : Représentation de l'interaction sensori-motrice par contextes enrichis de longueur fixe.

D'autres auteurs ont abordé la notion de contexte, de façon assez similaire, dans des tâches de localisation de robots mobiles. [Nehmzow-Smithers91b] traite la reconnaissance de contextes en utilisant un réseau de Kohonen [Kohonen89] dont l'entrée est un vecteur représentant une séquence d'actions (2 ou 3 rotations) produites par un agent situé en se déplaçant. Il s'agit également d'une notion de situation enrichie par un voisinage, mais le réseau de Kohonen ne code pas la topologie des contextes reconnus; aucune notion de transition contextuelle n'apparaît, seuls les contextes sont reconnus. De même, [Dedieu-Mazer91] parle du contexte comme de l'association d'une situation et d'une action. Aucun de ces travaux n'élargit la réflexion au traitement de voisinages de tailles supérieures et même adaptables par l'agent.

En ce qui nous concerne, la taille du voisinage à traiter reste à définir; deux sommets peuvent rester ambigus si l'on traite un voisinage de taille  $n$  et être différenciables par un traitement de taille  $n + 1$ .

### 8.7.4 Optimisation

D'un point de vue computationnel, la technique de maintien de la non-ambiguïté par enrichissement des contextes aboutit à un accroissement de la taille mémoire nécessaire à l'emmagasinage des connaissances de l'agent. Ainsi, pour un agent particulier, étant donnée une taille mémoire finie, la taille de traitement pouvant être considérée est bornée et calculable<sup>20</sup>.

De plus, ce processus de désambiguïsation peut encore être optimisé, car tous les contextes n'ont pas besoin d'être enrichis de la même façon; seuls les contextes ambigus nécessitent un enrichissement par l'accroissement de la taille du voisinage traité. Ainsi, dans l'exemple donné, seuls les contextes terminant par l'état sensoriel b ou d doivent être enrichis. Le graphe peut ainsi avoir des contextes de longueurs différentes. Ceci permet de maintenir un nombre minimal de sommets, tout en conservant la non-ambiguïté et le déterminisme du graphe.

La figure 8.5 donne le graphe optimal et minimal en nombre de sommets pour l'exemple traité.

## 8.8 Quelques propriétés

Les fondements conceptuels, les choix représentationnels et la réalisation pratique étant clarifiés, nous allons aborder trois propriétés du modèle de la connaissance que nous venons de proposer. Il s'agit

- de se convaincre que la représentation porte bien sur l'interaction sensori-motrice milieu-agent et non sur l'environnement proprement dit,

<sup>20</sup>En pratique, des tailles de traitement allant jusqu'à 4 (7 informations par contexte) sont envisageables pour des espaces sensoriels tels que ceux que nous avons utilisés (jusqu'à une dizaine de stimuli).

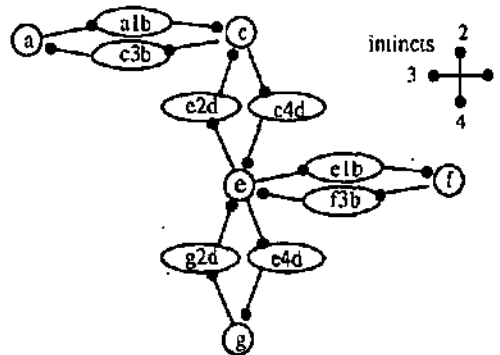


Figure 8.5 : Représentations sensori-motrices de l'interaction par contextes enrichis de longueur minimale.

- de revenir sur la nature "symbolique" de la représentation en nuancant quelque peu ce qualificatif dans le cadre d'une l'approche non-objectiviste de la connaissance,
- enfin, de soulever quelques perspectives que cette approche permet d'envisager; notamment dans le sens d'une poursuite de la structuration vers de plus hauts niveaux de cognition et, à long terme, vers une notion d'objet à travers une capacité que nous pensons proche de la capacité de décentration introduite par Piaget.

Ces propriétés reviennent en partie sur les questions de l'objet, du rôle et de la nature de la connaissance auxquelles nous avons répondu dans ce chapitre.

### 8.8.1 Représentation de l'interaction et du monde

Nous voulons ici attirer l'attention sur le fait que la représentation obtenue porte sur l'interaction et non sur le monde dans lequel nous observons l'agent évoluer. Pour cela, nous allons procéder de la façon suivante:

1. Montrer que la structure de la représentation est essentiellement dépendante de l'espace sensori-moteur propre à l'agent considéré.
2. Montrer qu'une même représentation peut correspondre à des environnements métriquement et structurellement différents.

Nous terminerons par évaluer et situer la part de contribution de l'environnement à la représentation extraite par l'agent.

Imaginons un nouvel agent *R2* physiquement similaire au premier agent *R1* (décrit dans l'exemple du chapitre 7). Le nouveau, *R2*, bien qu'il utilise les mêmes capteurs et effecteurs que *R1*, est comportementalement différent du premier; il n'est capable que d'observer un obstacle proche de lui et se trouvant sur sa droite ou en face de lui<sup>21</sup>. Face à ces deux stimuli, *R2* ne sait que "suivre l'obstacle en le maintenant sur sa droite". Dans tous les autres cas, il se déplace grâce à un deuxième instinct qui le fait "aller tout droit". Enfin, *R2* est attentif à la direction absolue (N, S, E, W) qu'il observe dans son mouvement de suivi d'obstacle.

La figure 8.6, représente l'environnement de *R2* (identique à celui de *R1*), ses trois stimuli, les 16 états sensoriels différents qu'il peut rencontrer, son parcours correspondant à la trace laissée dans l'environnement, l'historique observé et le graphe ambigu correspondant.

La représentation extraite est différente de celle extraite par *R1* dans le même environnement (voir figure 8.3).

<sup>21</sup>Il souffre de ce que les psychologues appellent une "négligence gauche".

## 8. Le niveau cognitif

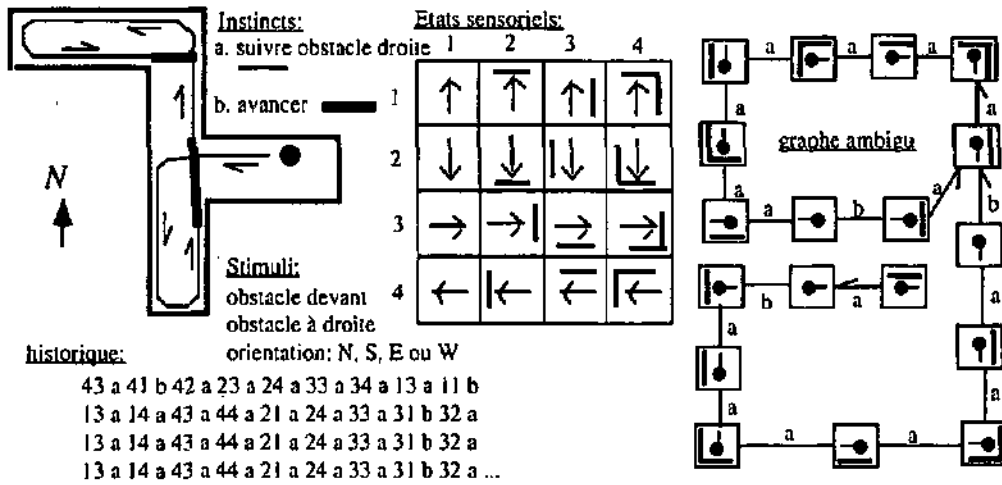


Figure 8.6 : Environnement, espace sensori-moteur, et représentation du robot *R2*.

Cet exemple illustre très clairement que deux robots physiquement identiques, utilisant un ensemble de capteurs et d'effecteurs identiques et évoluant dans un environnement également identique construisent deux représentations totalement différentes du fait qu'ils possèdent des espaces sensori-moteurs différents. C'est le niveau comportemental (les stimuli, les instincts et leur liaison à travers la fonction de stimulation  $\mathcal{F}$ ) qui détermine l'interaction sensori-motrice de l'agent et donc la représentation topologique qu'il s'en extrait.

Il va sans dire que ces variations ont été observées dans nos expériences.

Une deuxième propriété permet de confirmer cette émancipation de la représentation par rapport à l'environnement.

Imaginons cette fois les agents *R1* et *R2* équipés d'un système caméra leur permettant de détecter la présence d'une cible. On fournit aux deux agents un ensemble d'instincts identiques: ils sont programmés pour suivre un obstacle à droite (grâce aux informations sonar) et détecter les cibles sur leur gauche (à partir de l'image vidéo). Les stimuli sont: "obstacle à droite" et "cible à gauche". Toute configuration des stimuli ne fait que stimuler le seul comportement possible: "suivre l'obstacle qui est à droite". De plus, ils n'ont aucune notion d'orientation absolue; ils savent uniquement où se trouve l'avant, l'arrière, la droite et la gauche par rapport à leur propre orientation.

*R1* et *R2* sont devenus deux "frères jumeaux". On les place dans deux environnements différents ("à nos yeux"), ceux de la figure 8.7, on les laisse se comporter et construire leur représentation, puis on observe les résultats obtenus.

Les réponses de l'un et de l'autre seront identiques alors que leur environnement est différent. Cette représentation est faite de deux sommets contenant les états sensoriels "obstacle et cible" et "obstacle et non-cible", reliés par l'arc correspondant à l'instinct de "suivi d'obstacle à droite". Ils ont "exploité" les symétries de leur environnement pour construire une représentation minimale, basée sur l'observation de leur interaction.

Enfin, bien que ce dernier exemple démontre qu'un changement important (pas uniquement métrique) de l'environnement peut ne pas affecter la représentation qu'extrait l'agent, l'environnement influence généralement la structure de la représentation. Mais cette influence est minimale, l'environnement offre ses multiples topologies à l'espace sensori-moteur de l'agent. En effet, la topologie de l'interaction sera une projection de l'ensemble possible des topologies de l'environnement sur l'espace sensori-moteur particulier à l'agent.

Par rapport à notre adhésion au non-objectivisme, le but est atteint; la représentation de l'agent n'est pas "une représentation du monde".

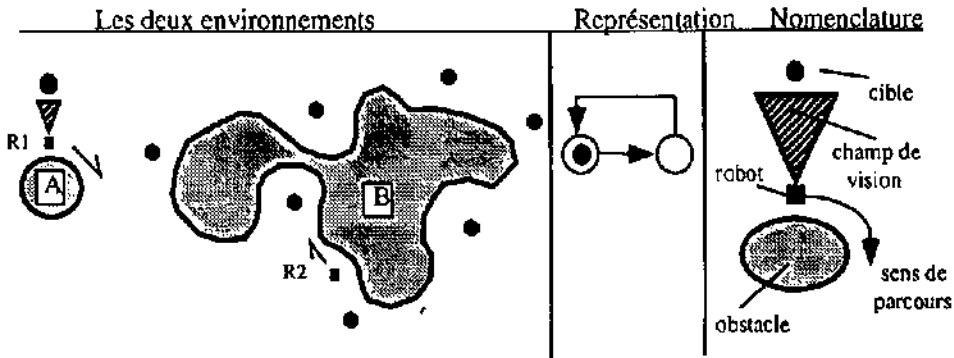


Figure 8.7 : Deux robots identiques, deux milieux différents, deux représentations identiques.

### 8.8.2 Une nouvelle nature symbolique

Déoulant de notre approche non-objectiviste de la représentation et par opposition à l'approche cognitiviste en IA, les symboles utilisés pour formaliser l'historique ne sont plus des éléments syntaxiques ayant une correspondance sémantique avec des objets d'un monde externe objectif. La correspondance est faite avec des phénomènes internes à l'agent, liés à son espace sensori-moteur.

De plus, cette source de connaissances est empiriquement récoltée, mémorisée et structurée, de façon naturelle et synchronique, par l'agent lui-même (voir chapitre 9). Cette prise en charge de la structuration permet de donner un "sens" à la représentation; celle-ci tient compte de l'espace sensori-moteur de l'agent et de son vécu singulier<sup>22</sup>.

De façon générale, certains auteurs, dont John Stewart [Stewart94], appuient cette nouvelle nature des représentations de l'agent en interaction avec son milieu. Elle apparaît également dans le concept de clôture opérationnelle chez Varela.

### 8.8.3 Perspectives

La représentation de la topologie de l'interaction peut être vue comme une base prometteuse, dans le cadre d'une cognition à plusieurs niveaux, pour élaborer des représentations plus abstraites. Cette problématique n'est pas considérée dans cette thèse mais pourrait faire l'objet d'une réflexion ultérieure.

Deux exemples simples et immédiats peuvent être considérés sur la base du graphe de la figure 8.4.

a) Connaissance portant sur l'action:

Il est aisé d'induire, à partir d'un tel graphe, des connaissances du genre: "l'instinct 1 est l'inverse de l'instinct 3 et réciproquement". La même règle s'applique aux instincts 2 et 4. Cette connaissance de plus haut niveau peut servir à douter des observations ne vérifiant pas la règle induite.

b) Connaissance portant sur la perception:

Sur la base de la règle d'inversion des instincts introduite au point a), il est possible d'extraire des circuits du graphe de la figure 8.4 permettant de regrouper des sommets dont le contexte termine par le même état sensoriel. Ces sommets sont susceptibles de

<sup>22</sup>En reprenant les termes de Payton (voir paragraphe 3.6.2), notre agent se crée ses plans linguistiques dans ses propres termes.

## 8. Le niveau cognitif

correspondre à des états sensoriels solidaires (certains parleraient de même "réalité", ou de même "objet").

Ces modestes contributions font apparaître des analogies frappantes avec la notion de décentration qui apparaît dans les travaux de Piaget et que Jean-Jacques Ducret dit être rattachée à une

"conception relativiste de la connaissance selon laquelle l'intelligence consiste en l'établissement de relations entre le divers perçu ou conçu. La coordination des points de vue spatiaux ou sociaux, la coordination des systèmes de référence spatio-temporelle de la physique relativiste, l'activité par laquelle un enfant ou un adulte conserve une classe d'objets alors même qu'il réunit ces objets avec d'autres pour former une classe d'extension plus générale, les activités perceptives par lesquelles le sujet apprend à compenser les déformations perceptives induites par les centrations spontanées, l'activité par laquelle le sujet met en quelque sorte à distance ses intérêts ou ses désirs personnels afin de tenir compte, dans ses décisions d'action, des intérêts ou des désirs d'autrui, l'ensemble de ces activités forment des cas particuliers de la conduite de décentration dont on peut dire qu'elle constitue le propre des régulations cognitives".

Dans ce cadre, nous situerions notre traitement de la connaissance en phase de centration spontanée, mais offrant des perspectives intéressantes de décentrations à travers une variété de structurations possibles.

Remarquons enfin que la capacité d'abstraction, permettant de monter les niveaux de représentation, tend à faire oublier la méthodologie non-objectiviste. Or, les deux concepts, capacité d'abstraction et non-objectivisme, sont totalement compatibles. Il est même judicieux, dans la problématique des agents autonomes, de conserver cette méthodologie, même dans le cadre d'une cognition de haut niveau où les représentations s'approchent de notre point de vue "objectiviste".

### 8.9 Résumé

Dans le traitement de la connaissance de l'agent que nous modélisons, nous avons débuté par différencier plusieurs niveaux de cognition; chaque niveau correspond conceptuellement à un degré d'organisation et de complexité de la connaissance et englobe les mécanismes de gestion propres à cette connaissance. La transition d'un niveau cognitif à son niveau supérieur se fait par structuration de la connaissance de base.

Nous avons ainsi distingué deux niveaux de cognition:

- le premier niveau correspond à l'interaction milieu-agent telle qu'elle est vécue par l'agent, représentée par son historique sensori-moteur,
- le second niveau correspond à la topologie de l'interaction représentée par un graphe résultant d'une structuration de l'historique sensori-moteur.

Ainsi, en adoptant une approche non-objectiviste de la connaissance (opposée à l'approche traditionnelle de l'IA), l'interaction milieu-agent est devenue le seul objet de connaissance de notre agent. Nous avons formalisé cette interaction à l'aide du langage comportemental introduit au chapitre 7 (stimuli, instincts, fonction de stimulation).

De plus, le choix d'une structure de graphe comme représentation de la topologie de l'interaction permet d'envisager des graphes déterministes et non-ambigus à la fois. Ainsi, à travers la construction d'une représentation symbolique de son interaction, l'agent obtient une connaissance structurée qui conserve une sémantique opératoire à ses yeux:

## Modélisation d'un agent autonome

- d'une part, la dernière séquence sensori-motrice observée de longueur  $L$  correspond directement à un contexte localisable par un sommet du graphe,
- d'autre part, le choix d'un arc dans le graphe correspond à une transition univoque entre contextes et peut se traduire directement par la sélection d'un instinct particulier, celui porté par l'arc.

Ces propriétés suffisent à mettre en oeuvre les capacités d'auto-localisation instantanée et de prédiction; elles sont essentielles à l'agent pour fonctionnaliser de façon adéquate son activité et donc pour favoriser son autonomie.

Finalement, nous avons souligné que

- la représentation structurée que nous envisageons porte sur l'interaction milieu-agent et non directement sur l'environnement; il s'agit donc d'une représentation qui s'est affranchie du monde, ce qui évite la problématique de création d'un isomorphisme monde-représentation,
- la représentation étant de nature sensori-motrice, elle garde une sémantique opérationnelle pour l'agent, ce qui la différencie des représentations classiques utilisées en IA,
- enfin, la représentation de la topologie de l'interaction peut servir de base à l'extraction de régularités de différentes natures; en particulier, il est possible de mettre en oeuvre des mécanismes permettant la reconnaissance d'états solidaires dans des contextes différents (notion de "même objet", décentration).

En revanche, comme nous l'avons déjà précisé, les représentations utilisées sont le reflet de notre vision des choses, selon un point de vue externe à l'agent. Il faut encore que l'agent puisse, de lui-même, construire et gérer ce genre de représentations. C'est l'objet des processus cognitifs que nous allons introduire au chapitre suivant.

# Les processus cognitifs

Le chapitre 8 nous a permis de spécifier deux niveaux de connaissance portant sur des abstractions de différentes natures; l'interaction sensori-motrice milieu-agent et la topologie de cette interaction. La première est représentée par une séquence formée d'une succession d'états sensoriels observés et d'instincts sélectionnés; il s'agit de l'historique de l'agent. La seconde est représentée par un graphe dont les sommets représentent les contextes rencontrés et les arcs représentent les transitions entre ces contextes.

Ce chapitre 9 a pour objectif de décrire les mécanismes permettant d'une part de combler le fossé séparant ces deux représentations par des processus de structuration et, d'autre part, de gérer et d'exploiter la connaissance structurée.

## 9.1 Introduction

La cognition désigne l'ensemble des actes et processus de connaissance par lesquels un système acquiert de l'information, l'emmagasine, la traite et l'exploite. Le terme est plus large que celui de connaissance qui s'applique de façon spécifique aux savoirs accumulés, considérés indépendamment des systèmes qui les ont acquis ou qui les utilisent. A l'inverse, la cognition fait référence à un système particulier et renvoie nécessairement à son activité. En psychologie, les processus considérés sont, traditionnellement, la perception, l'apprentissage, la mémoire, l'intelligence, l'abstraction symbolique et le langage.

Dans le cadre de notre architecture cognitive, nous considérons trois processus cognitifs qui correspondent aux capacités d'interprétation, d'apprentissage et de motivation. C'est ainsi que nous les nommons.

Ces processus s'articulent autour de la connaissance structurée de l'agent.

L'interprétation est à l'écoute des événements sensori-moteurs provenant du niveau comportemental. Elle filtre les informations en leur donnant une cohérence.

L'apprentissage structure la connaissance en fonction des régularités rencontrées dans l'historique sensori-moteur.

La motivation situe les besoins de l'agent et facilite l'orientation des décisions devant être prises par l'agent.

La collaboration des trois processus aboutit à l'émergence de la capacité de fonctionnalisation qui consiste en l'exploitation la plus adéquate possible de l'activité, en vue de satisfaire les critères d'évaluation ([survie], [rôle social] et [évolution]). L'autonomie correspond alors à une fonctionnalisation adéquate.

Nous allons spécifier chacun des processus cognitifs en trois étapes. Nous commençons par introduire les concepts et la terminologie qui leur sont associés dans le cadre des sciences cognitives et qui permettent d'interpréter les traitements proposés ici. Nous énonçons ensuite la problématique à laquelle ils répondent et décrivons les solutions proposées par notre travail.

Chaque processus cognitif sera défini par rapport à la connaissance sensori-motrice. Nous justifierons également sa présence dans le cadre de l'architecture cognitive. Les indications apportées permettent la mise en oeuvre algorithmique de ces processus.

### *Modélisation d'un agent autonome*

La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la capacité de fonctionnalisation. Nous la définirons par rapport aux trois processus cognitifs et en donnerons une spécification algorithmique sous la forme de différentes stratégies de décision. Nous terminerons par quelques observations tirées des expériences de l'application du modèle à nos robots mobiles.

## 9.2 L'interprétation

La notion d'interprétation correspond de façon générale à donner un sens, une signification particulière aussi précise et cohérente que possible.

Nous sommes constamment dépendants des interprétations plus ou moins conscientes que nous faisons des événements qui forment notre vécu quotidien. Nous interprétons le passé, nous vivons le présent en l'interprétant et nous allons jusqu'à interpréter ce que nous pouvons prévoir du futur. L'interprétation apparaît donc à tout moment et sur toute chose.

C'est une version réduite de cette capacité générale que nous abordons en tant que processus de l'architecture cognitive dans notre modèle d'agent autonome.

Avant même d'en parler, disons que l'analogie est certainement abusive (cela est d'ailleurs vrai pour chacun des processus cognitifs). Néanmoins, c'est en grande partie grâce à ces analogies que les processus que nous allons présenter sont ce qu'ils sont. Sans elles, nous n'aurions probablement pas considéré certains aspects qui, une fois le modèle complété, nous paraissent essentiels pour l'ensemble du système.

### 9.2.1 Concepts et terminologie

Nous allons retenir deux éléments qui nous ont paru centraux à la notion d'interprétation; il s'agit du *système référentiel* sur lequel se base cette interprétation et la part d'*influence des facteurs externes (et internes)* dans le processus d'interprétation.

#### Le système référentiel

L'élément clé de la capacité d'interprétation est l'existence d'un *système référentiel* permettant, par projection, de comprendre les phénomènes observés; il est le support des capacités de catégorisation ou classification. Un tel système référentiel est déterminant pour différentes raisons:

- sa richesse et son organisation déterminent la capacité de l'agent à discerner,
- un meilleur discernement influence positivement la capacité d'adaptation aux situations rencontrées,
- ces mêmes richesse et organisation influencent également la quantité de connaissances à mémoriser et donc la nature et la taille de mémoire nécessaire,
- enfin, en liaison avec la mémoire, l'efficacité des mécanismes devant être mis en oeuvre pour accéder aux connaissances est également dépendante du système référentiel.

Traditionnellement, les travaux en catégorisation proposent des approches variées dont les deux suivantes sont caractéristiques:

- La première considère chaque catégorie comme précisément définie par un ensemble de traits distinctifs particuliers (les attributs). Dans ce cas, tous les membres d'une même catégorie partagent ses attributs et sont également représentatifs de celle-ci.
- Une seconde approche considère un prototype par catégorie et définit une mesure: les différents membres de la catégorie sont plus ou moins proches de ce prototype suivant cette mesure (notion de typicalité). Les frontières entre catégories sont dans ce cas plus floues. Un élément peut plus ou moins appartenir à différentes catégories (approche probabiliste)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> La catégorisation fait également l'objet de travaux importants et probants dans le domaine connexionniste; le réseau de Kohonen, par exemple, constitue un mécanisme automatique permettant d'extraire des catégories prototypes reflétant la distribution d'un ensemble d'entrées fournies au système [Kohonen89].

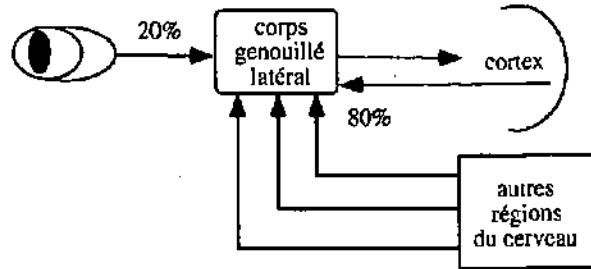


Figure 9.1 : Proportion d'informations externe/interne en perception visuelle (tiré de [Varela88]).

### Influence externe et influence interne

En sciences cognitives, les éléments intervenant dans le processus d'interprétation ne sont que partiellement déterminés et ce sujet reste un domaine d'étude largement ouvert.

En perception visuelle, par exemple, l'approche simpliste du traitement de l'information consiste à dire que l'information pénétrant par les yeux est transmise au thalamus<sup>2</sup> à travers le nerf optique, puis au cortex visuel où les traitements majeurs sont mis en oeuvre. Or, Varela cite de récents travaux en neurobiologie où il apparaît que l'information de source externe parvenant au corps genouillé latéral<sup>3</sup> ne représente que le 20% des informations traitées par cette région du cerveau. Le reste des informations provient d'autres régions cérébrales et du cortex lui-même.

Ces observations tendent à valoriser une notion de cohérence d'interprétation basée essentiellement sur l'attente interne et sur le degré de correspondance entre cette attente et l'état observé (par extéroception). En raison de la disproportion quantitative de ces deux sources, il n'est pas étonnant que l'attente puisse aller jusqu'à masquer l'observation!

### 9.2.2 Une approche concrète

Après avoir mentionné ces deux éléments liés à la capacité psychologique d'interprétation, nous allons préciser le traitement que nous avons fait de ce processus, dans le cadre de notre architecture cognitive.

Nous commençons par situer notre travail par rapport à la définition même d'interprétation. Nous spécifions ensuite le système référentiel et la nature des catégories que nous utilisons. Enfin, nous introduisons la problématique liée au processus d'interprétation et décrivons la solution proposée par notre travail.

#### Caractérisation

En rapport avec la notion d'interprétation telle qu'elle apparaît traitée en sciences cognitives, nous nous situons de la façon suivante:

- Nous abordons l'interprétation dans un sens faible; rassembler, en un tout cohérent, le plus grand nombre possible de faits empiriques. Ce choix est moins prétentieux que celui consistant à vouloir donner un sens, une signification aux informations traitées. Il est également plus adéquat dans le cadre d'une interprétation artificielle.
- Dans le cadre de notre application, le système référentiel de l'agent est donné par l'espace sensori-moteur (l'espace sensoriel en particulier).

<sup>2</sup>Partie du cerveau qui peut être vue comme un relais sensitif.

<sup>3</sup>Région du thalamus.

## 9. Les processus cognitifs

- Il s'agit donc d'un système référentiel donné a priori (inné) dont l'évolution se limite à des défaillances au niveau physique (capteurs ou effecteurs) réduisant la part utilisée de l'espace sensori-moteur.
- Enfin, l'appartenance d'un stimulus à l'une des catégories sensorielles ou d'un instinct à l'une des catégories motrices est exprimée en tout ou rien. L'agent est à tout instant dans un état sensori-moteur particulier et précis.

### La problématique

La problématique de l'interprétation dans notre modèle se résume à trois questions:

- Quels sont les critères de cohérence adéquats à l'interprétation de l'espace sensori-moteur?
- Quels types de régularités sont pertinentes et comment les traiter?
- Enfin, en quoi consiste l'attente interne et comment l'intégrer à l'interprétation de l'état observé?

Nous allons répondre à ces questions en précisant le traitement fait par notre algorithme d'interprétation.

### Définition du processus

Au lieu de traiter le sens, notre approche de l'interprétation tend à fournir à l'agent un outil de maintien de la cohérence dans l'analyse de son vécu sensori-moteur. Il s'agit de pouvoir catégoriser (reconnaître) les états sensoriels successifs (résultat de l'observation) tout en tenant compte des attentes (prévisions sensorielles tirées de l'expérience). Ainsi, nous définissons l'interprétation comme suit:

*L'interprétation est la détermination des régularités de l'interaction qui sont pertinentes et exploitables contextuellement, étant donné un état de connaissance et une attente tirée de l'expérience.*

Les régularités peuvent porter sur la structure *morphologique* ou sur la structure *causale* des événements sensori-moteurs. Ces deux facettes de l'interprétation interviennent dans notre traitement; la première consiste à extraire des relations de simultanéité entre événements sensoriels (on parle de filtrage), la seconde s'intéresse aux relations causales faisant intervenir, dans leur séquençement temporel, l'action et l'effet sensoriel observé (on parle de localisation).

### Morphologie: détermination de l'état sensoriel courant

Dans notre modèle, l'aspect morphologique intervient dans la comparaison de l'état prévu (attente) et de l'état observé. C'est cette comparaison qui permet au processus d'interprétation de déterminer la valeur du nouvel état sensoriel  $p(t) \in \mathcal{P}(\mathcal{S})$  devant être inséré dans l'historique sensori-moteur  $H(t)$ . Suivant le résultat de cette comparaison le traitement du processus d'interprétation est différent.

Soit  $P$  l'état sensoriel prévu en fonction des connaissances internes de la topologie de l'interaction (le graphe) et de l'instinct  $i(t-1)$  sélectionné. Soit  $O$  le nouvel état observé. Quatre cas peuvent apparaître:

A. Si  $O = P$ , l'attente est satisfaite et l'interprétation considère que  $p(t) := O (= P)$ .<sup>4</sup>

Dans tous les autres cas, l'agent se trouve face à l'inégalité  $O \neq P$ . Dès lors, trois possibilités s'offrent à lui:

---

<sup>4</sup>Deux états sensoriels sont équivalents lorsque tout stimulus apparaît dans l'un si et seulement si il apparaît dans l'autre.

B. Il doute de l'observation  $O$  sans douter de l'attente  $P$ .

L'observation peut, en effet, être perturbée ou provoquée par un événement sporadique et éphémère dans l'environnement. Dans ce cas, il ne se prononce pas immédiatement au sujet de la valeur prise par  $p(t)$ .

C. Il doute de l'attente  $P$  sans douter de l'observation  $O$ .

L'effet prévu  $P$  est remis en cause et révisé (par le processus d'apprentissage). L'observation  $O$  devient le nouvel état sensoriel:  $p(t) := O$ .

D. Il doute de  $O$  et de  $P$ ; il considère s'être perdu et doit alors se relocaliser.

Dans ce cas, c'est la connaissance ayant permis la prédiction  $P$  qui est remise en cause. Ainsi,  $p(t) := O$  et le lien causal apparaissant dans la transition observée allant de  $p(t-1)$  à  $p(t)$  par l'instinct  $i(t-1)$  n'est pas considéré.

Le cas B est le seul à ne pas déterminer la valeur de  $p(t)$ . Il aboutit à une vérification de la stabilité de l'état observé  $O$ . Ceci se fait en conjuguant deux stratégies:

1. Soient  $S^+$  et  $S^-$  les ensembles de stimuli différenciant  $O$  de  $P$  ( $S^+ = O - (O \cap P)$ ,  $S^- = P - (O \cap P)$ ). L'agent va reconsidérer les données fournies par l'ensemble des instincts provoquant  $S^+$  et  $S^-$  dans l'espoir qu'ils proposent la contribution que la prévision attend d'eux. En cas de satisfaction sur ces sous-états  $S^+$  et  $S^-$ , l'équivalence globale est à nouveau vérifiée.

Cette première stratégie correspond à une attention par focalisation sur les éléments introduisant des différences par rapport à la prévision  $P$ .

2. Il peut également perturber le champ sensoriel par un léger mouvement aléatoire.

Cette stratégie a pour but de sortir l'agent de zones fortement perturbatrices.

L'application simultanée de ces deux stratégies est maintenue pendant un laps de temps absolu réduit. Au mieux, elle conduit à l'apparition de l'équivalence  $O = P$  (situation A). Au pire, une différence persiste et la situation D est considérée.

Dans ce même cas B, une solution intermédiaire peut être considérée si  $S^- = \emptyset$  et si la fonction de stimulation  $\mathcal{F}$  conserve la relation d'inclusion; cette propriété sur  $\mathcal{F}$  revient à dire que si le cas  $P \subset O$  se produit (la prévision  $P$  est contenue dans l'observation  $O$ ), alors l'inclusion  $\mathcal{F}(P) \subset \mathcal{F}(O)$  est assurée. Ainsi, il est possible de rattraper les cas où  $P \neq O$  et  $S^- = \emptyset$  (c'est à dire  $P \subset O$ ) en traitant ces cas comme s'il y avait équivalence, ce qui aboutit à poser  $p(t) := P$ .

Cette stratégie est cohérente car, sachant que  $\mathcal{F}(P) \subset \mathcal{F}(O)$ , cette inclusion garantit que tout instinct choisi parmi  $\mathcal{F}(P)$  sera stimulé, vu que tous ceux de  $\mathcal{F}(O)$  le sont.

Ce traitement est un juste milieu entre une mise en doute de la connaissance ayant permis la prévision et la recherche de l'équivalence stricte dans la comparaison prévision-observation.

Le cas C correspond à l'interprétation simpliste ne faisant intervenir que l'ensemble des informations externes dans le processus d'interprétation. Dans notre système, cela intervient lorsque la connaissance semble manquer de cohérence ou lorsqu'aucune prévision n'est réalisée par le système du fait que la connaissance est incomplète; c'est le cas lorsqu'un instinct est considéré pour la première fois depuis un contexte particulier.

Enfin, le cas D correspond à douter du résultat d'interprétations précédentes dans la tâche de localisation. Il aboutit à se déconnecter causalement du passé récent, en repartant avec l'état observé sans le connecter au contexte précédent. Le traitement de ce cas nous mène à la capacité de localisation.

### Causalité: auto-localisation par détermination du contexte

L'auto-localisation (*localisation* pour simplifier) correspond à la dimension causale du processus d'interprétation; ce sont les séquences sensori-motrices qui y sont analysées pour déterminer le contexte courant. La démarche a déjà été introduite au paragraphe 8.7.3.

Pour la résumer, disons qu'une quantité d'information suffisante ( $2L + 1$  éléments), tirée de l'historique, permet à l'agent de se localiser synchroniquement. La taille de traitement  $L$  permet de déterminer le contexte courant par

$$c(t) = [p(t - L)i(t - L)p(t - L + 1) \dots i(t - 1)p(t)]$$

Or, le contenu de chaque sommet du graphe étant unique, en connaissant le contexte  $c(t)$  le processus d'interprétation peut déterminer immédiatement le sommet courant.

Au début du vécu de l'agent, le synchronisme est toutefois impossible car il faut attendre d'avoir observé  $L + 1$  états sensoriels pour pouvoir déterminer le premier contexte. Ce synchronisme est également momentanément interrompu (l'espace de  $L$  pas) lorsque l'agent considère s'être perdu et se re-localise; dans ce cas, l'agent interrompt le déroulement sensori-moteur causal en partant sur le nouvel état observé comme s'il s'agissait du premier état sensoriel de son vécu.

### 9.2.3 Commentaires

Le traitement réalisé par le processus d'interprétation permet de répondre à la problématique énoncée en proposant des stratégies d'extraction des régularités morphologiques et causales des événements sensori-moteurs composant l'historique.

Ce processus d'interprétation est primordial dans notre architecture cognitive; il fournit à l'agent

- une stratégie de reconnaissance des états sensoriels successifs,
- un mécanisme de localisation synchronique.

La première contribution correspond à un filtrage des informations sensorielles observées en tenant compte d'informations internes telles que l'attente sensorielle, l'état de la connaissance, le caractère partiel de celle-ci ou son degré de cohérence. Ce filtrage, réalisé au moment où les phénomènes sont perçus, favorise l'extraction et la reconnaissance des régularités causales observées.

La seconde contribution permet, en localisant l'agent de façon univoque, de réduire l'ensemble des hypothèses intervenant dans les prédictions futures. Nous avons vu qu'il s'agit là d'une capacité abductive qui est essentielle.

Ces deux contributions liées au processus d'interprétation jouent donc un rôle primordial par rapport à la capacité de l'agent de rendre adéquate la fonctionnalisation de son activité.

## 9.3 L'apprentissage

De manière générale, l'apprentissage, terme plus spécifique que celui d'acquisition, correspond à une modification du comportement d'un système, résultant de l'interaction qu'il entretient avec son milieu. Il a pour conséquence d'ajuster le répertoire d'interactions possibles et d'accroître ainsi la capacité d'adaptation du système à son milieu. D'autre part, il facilite l'exploitation de ce milieu par le système.

Comme nous l'avons vu au paragraphe 7.1.3, nous considérons qu'il est faux de parler d'apprentissage lors de variations comportementales liées à un processus de maturation car, dans ce cas, les facteurs liés à l'expérience et à l'interaction avec le milieu ne sont pas déterminants.

De même, nous considérons qu'il n'y a pas d'apprentissage lorsque la modification comportementale est liée à des facteurs internes telles que la faim, la fatigue ou le stress. Ce type de facteurs sera abordé dans le cadre du processus de motivation.

### 9.3.1 Concepts et terminologie

En sciences cognitives, il est d'usage de distinguer différents *types d'apprentissage*. Ils apparaissent à des niveaux de complexité différents et font intervenir une grande variété de termes et d'abstractions caractéristiques.

Nous allons passer en revue quatre mécanismes généraux d'apprentissage et deux propriétés qui semblent être communes à la plupart de ces mécanismes. Nous terminerons par aborder la notion de carte cognitive comme support à l'apprentissage. Cette abstraction correspond au type de connaissance structurée que nous considérons dans ce travail.

#### Quelques mécanismes d'apprentissage

Certains courants scientifiques de ce siècle (béhaviorisme et cognitivisme essentiellement) ont contribué à extraire un ensemble de mécanismes types que nous allons parcourir dans l'ordre d'un accroissement de complexité: il s'agit de l'habituation, du conditionnement, de l'apprentissage sensori-moteur et de l'apprentissage symbolique.

**L'habituation.** Le terme d'habituation désigne le mécanisme général et vital d'accoutumance d'un organisme à certaines excitations sensorielles répétées auxquelles il finit par ne plus réagir. Ce mécanisme correspond à un niveau d'apprentissage élémentaire; on parle d'apprentissage pré-associatif ou non-associatif.

Par exemple, une goutte d'eau tombant sur la corolle d'une anémone de mer provoque sa contraction. Pourtant, après plusieurs gouttes successives, elle cesse de réagir. Si la même expérience est répétée plus tard elle conduit aux mêmes observations. Ceci tend à indiquer que l'expérience n'a pas laissé de trace interne permanente; il n'y a pas eu d'association.

De façon intuitive, ce mécanisme sert à éviter que l'organisme ne réponde de façon inutile et répétitive à certains stimuli, tout en conservant sa réactivité par rapport à ceux-ci.

**Le conditionnement.** Il s'agit là d'un mécanisme associatif qui fut étudié principalement par Pavlov<sup>5</sup>, dès 1902. Il est basé sur les notions de stimulus conditionné ou inconditionnel et de réponse conditionnée ou inconditionnelle. Par *conditionné* il faut entendre "de remplacement" et par *inconditionnel* il faut entendre "naturel", "d'origine".

Cette théorie affirme qu'un stimulus conditionné associé à un stimulus inconditionnel provoque une réponse conditionnée similaire à la réponse inconditionnelle. Dans l'expérience connue du chien de Pavlov, un stimulus quelconque (le son d'une cloche ou la blouse du

---

<sup>5</sup>Ivan Petrovitch Pavlov, physiologiste russe (1849-1936). Prix Nobel en 1904 pour ses travaux sur les glandes digestives.

## 9. Les processus cognitifs

préparateur), pourvu qu'il soit associé dans le temps avec un stimulus naturel (la nourriture par exemple), peut progressivement déclencher le processus de salivation, initialement adapté au seul stimulus naturel. Après l'association, le chien réagit à la sonnerie par une salivation, même si la nourriture ne lui est pas présentée<sup>6</sup>.

Ainsi, la notion de conditionnement tend à expliquer l'apparition de nouvelles liaisons stimulus-réponse par la capacité d'association d'un stimulus naturel et d'un stimulus conditionné.

Au début du siècle, ce type d'observations fit considérer le réflexe comme un prototype de processus mental élémentaire. La pensée est alors vue comme essentiellement constituée d'associations entre des images. De nos jours, ces mêmes expériences sont réinterprétées à la lumière de nouvelles théories.

**L'apprentissage sensori-moteur.** La notion de conditionnement a été élargie par certains néo-béhavioristes à des apprentissages faisant intervenir les conséquences du comportement.

Ainsi, Skinner<sup>7</sup> explique le contrôle du comportement par ses conséquences; c'est la satisfaction obtenue à travers un comportement qui suscitera sa répétition.

De même, Thorndike<sup>8</sup> exprime ce qui est connu comme la *loi de l'effet*; cette loi considère des connexions stimulus-réponse modifiables qui se voient consolidées ou affaiblies suivant que l'état qu'elles provoquent est jugé satisfaisant ou désagréable par le système.

La notion plus générale d'*apprentissage par essais et erreurs* recouvre ces deux approches; sur la base d'une série de tentatives fructueuses ou non, ce type d'apprentissage permet de favoriser les causes des tentatives fructueuses (on parle également d'apprentissage par renforcement).

Dans une conception hiérarchisée des conduites acquises, l'apprentissage par essais et erreurs est considéré de plus haut niveau que celui du conditionnement pavlovien.

**L'apprentissage symbolique.** Après un grand saut qualitatif, nous nous retrouvons au niveau symbolique (presque verbal) dans lequel l'apprentissage consiste à mettre en relation deux ou plusieurs symboles. On retrouve donc la notion d'association qui, cette fois, porte sur des unités symboliques dans le but d'associer leur sens, ce qu'ils représentent ("lion" et "force", par exemple).

Cet aperçu rapide et schématique des différents types d'apprentissage permet de souligner l'importance de cette même capacité à différents niveaux de complexité.

Par opposition aux béhavioristes qui considèrent les mécanismes d'habituation et de conditionnement comme fondamentaux et généraux (ils interviendraient à chaque niveau d'abstraction, du sensori-moteur au symbolique), les cognitivistes supposent des mécanismes d'apprentissage différents à chaque niveau d'abstraction, d'organisation et de complexité.

### Deux propriétés communes

Les mécanismes d'apprentissage que nous venons d'aborder se basent essentiellement sur deux notions communes que nous allons rapidement passer en revue; il s'agit de la *contiguïté* et du *renforcement*.

---

<sup>6</sup>Il semble même que la résistance de l'organisme aux microbes soit un réflexe susceptible d'être conditionné; en précédant d'un choc électrique une injection de microbes (ce qui normalement provoque une production d'anticorps), on peut, par la suite, arriver à provoquer la même production d'anticorps de la part de l'organisme par un simple choc électrique, sans qu'aucune injection ne soit réalisée. Ces conditionnements intéroceptifs sont plus lents à établir mais plus résistants à disparaître.

<sup>7</sup>Burrhus Frederic Skinner, psychologue américain [1904-1990]. Il s'est intéressé à l'apprentissage et à l'enseignement programmé dont il est l'auteur (l'idée est que le renforcement de l'étudiant résulte de la satisfaction que lui procure la vérification de la bonne réponse qu'il a su donner à une question).

<sup>8</sup>Edward Lee Thorndike, psychologue américain [1874-1949]. Il s'est essentiellement intéressé à l'apprentissage.

**La contiguïté.** Les mécanismes associatifs semblent exploiter la contiguïté d'événements observables; cette contiguïté permet

- l'association de stimuli dans le conditionnement,
- l'association de l'action et de son effet dans l'apprentissage sensori-moteur,
- l'association d'unités sémiotiques au niveau symbolique.

Des éléments proches dans le temps (à la limite se succédant immédiatement) ont tendance à être associés.

Cette propriété de contiguïté est celle que nous exploitons dans le traitement causal permettant l'extraction empirique de la topologie de l'interaction.

**Le renforcement.** Le renforcement est lié à la notion de récompense a posteriori et sert à consolider une connexion structurelle ou une décision qui s'est avérée bénéfique pour le système.

Cette loi est retrouvée dans des domaines aussi divers que le connexionnisme (loi de Hebb, par exemple) ou la pédagogie (notes et appréciations).

En règle générale, tout apprentissage a besoin d'être renforcé pour pouvoir durer.

### Un support d'apprentissage; la carte cognitive

Le terme de *carte cognitive* fut introduit par le psychologue Edward Tolman<sup>9</sup> [Tolman32]. Elle est une "représentation interne qu'un organisme se fait de l'organisation de l'espace dans lequel il se déplace". De façon plus générale, et dans notre travail en particulier, ce terme couvre toute représentation propre à un système, extraite de son interaction avec un milieu et qui lui sert à se guider dans cet espace ou à y résoudre des problèmes quelconques.

La notion de carte cognitive suppose une variable intermédiaire entre le stimulus et la réponse. Ainsi, elle va au-delà du mécanisme d'acquisition d'enchaînements de mouvements (apprentissage béhavioriste) et suggère la mise en mémoire d'une information relative à l'organisation spatiale de l'environnement. Historiquement, cette notion est un signe avant-coureur du mouvement cognitiviste qui s'intéresse, par opposition au béhaviorisme, aux mécanismes mentaux.

Enfin, bien que certains physiologistes aient cherché le support cérébral de telles cartes cognitives (dans l'hippocampe notamment), cette notion reste une abstraction psychologique. En IA, par contre, elle débouche sur des structures informatiques concrètes. Le terme y a été explicitement repris dans des travaux tels que [Mataric90, Dedieu-al.94, Roitblat91, Yeap88, Jamon91] notamment.

### 9.3.2 Une approche concrète

Après avoir mentionné quatre mécanismes, deux propriétés et un support d'apprentissage, nous allons préciser le traitement que nous avons fait de ce processus, dans le cadre de notre architecture cognitive.

Nous commençons par situer notre travail par rapport aux mécanismes généraux d'apprentissage. Nous introduisons ensuite la problématique liée au processus d'apprentissage et décrivons les algorithmes proposés.

---

<sup>9</sup>Edward Chace Tolman, psychologue américain [1886-1959]. Il s'est intéressé à la psychologie comparée et aux problèmes de l'apprentissage. Il rejeta le schéma Stimulus-Réponse béhavioriste en s'inspirant du fonctionnalisme et de la psychologie de la forme (Gestaltpsychologie).

### Caractérisation

Le chapitre 8, dans lequel nous avons décrit la nature de la connaissance, a permis d'établir que notre processus d'apprentissage s'appuie sur l'interaction milieu-agent et sur l'expérience qui en découle.

La connaissance est acquise de bout en bout, l'agent n'ayant, au départ, aucune connaissance de son interaction avec le milieu. Le processus d'apprentissage s'inscrit donc dans un cadre empirique et ontogénétique. Les règles d'association que nous utilisons sont basées sur la propriété de contiguïté temporelle qui, associée au mécanisme général de renforcement, permet de construire par cumul d'expériences une carte cognitive selon une approche constructiviste.

### La problématique

La problématique liée au processus d'apprentissage a été largement discutée au chapitre 8, lorsque nous avons introduit les deux niveaux de connaissance que sont l'historique sensori-moteur et le graphe représentant la topologie de l'interaction milieu-agent.

Ainsi, le processus d'apprentissage s'occupe du passage de l'un des niveaux à l'autre. Il s'agit de voir comment structurer la connaissance linéaire de l'historique en un graphe constituant la carte cognitive de notre agent.

Les traitements de graphes correspondent généralement à des processus lourds d'un point de vue algorithmique. La contrainte supplémentaire que nous considérons est de permettre un traitement facilitant la mise à jour synchronique de cette structure; en effet, seule une prise en compte et une satisfaction de cette contrainte permettent d'aborder des applications réelles.

### Définition du processus

Suite à la caractérisation du processus d'apprentissage, nous le définissons comme suit:

*l'apprentissage est l'acquisition empirique, la structuration et la contextualisation de connaissances portant sur les régularités observées de l'interaction.*

Il s'agit en particulier de construire une structure interne reflétant la topologie de l'interaction. Dans ce cadre, l'apprentissage est formé aussi bien d'ajouts que de retraits d'éléments structurels. Nous allons tout d'abord introduire l'apprentissage "en croissance", puis l'apprentissage "en décroissance"; si le premier type est naturel du fait qu'il correspond à une acquisition de nouvelles connaissances, le second est moins naturel dans le sens où il correspond à une remise en question des connaissances acquises. De même, s'il est aisé d'apprendre, il est généralement plus difficile de "désapprendre"; ceci est vrai pour toutes les techniques d'apprentissage, aussi bien dans des systèmes artificiels que naturels.

### Apprentissage en croissance

La croissance du graphe en sommets et en arcs est dictée par le processus d'interprétation; chaque fois qu'un contexte inédit  $c(t)$  apparaît, le processus d'apprentissage introduit un nouveau sommet isolé dans le graphe et l'affecte du contenu adéquat  $c(t)$ .

De plus, le processus d'interprétation fournit synchroniquement les contextes successifs  $c(1), c(2), \dots, c(t-1), c(t)$  et le processus d'apprentissage connaît la succession des instincts  $i(1), i(2), \dots, i(t-1)$  ayant été sélectionnés par le niveau cognitif. En particulier, il connaît l'instinct  $i(t-1)$  susceptible d'avoir provoqué la dernière transition. L'apprentissage peut donc laisser trace de cette transition sur la représentation interne. La technique est la suivante:

- A. Si l'instinct  $i(t-1)$  n'a jamais été expérimenté depuis le contexte  $c(t-1)$ , la transition  $[c(t-1), i(t-1), c(t)]$  est ajoutée au graphe.
- B. Si la transition existe déjà, la connaissance s'est simplement vérifiée et aucune modification structurelle n'intervient.

C. Si une transition différente est connue pour l'instinct  $i(t-1)$  depuis le contexte  $c(t-1)$  vers un contexte  $c \neq c(t)$ , la prise en compte de cette nouvelle information conduirait à l'introduction d'un point de non-déterminisme dans le graphe. Quatre stratégies sont proposées:

- (a) Dans le souci de maintenir le déterminisme du graphe, l'ancienne transition est retirée et la nouvelle est ajoutée.
- (b) En acceptant le non déterminisme mais dans le souci de le contrôler, on introduit des poids (ou probabilités de transition) sur les arcs.

Un poids maximal (disons 1) est ajouté à la nouvelle transition et le poids des autres se retrouve réduit de moitié. Si une ancienne transition de poids  $p < 1$  est à nouveau observée, elle prend le poids 1 et les autres sont réduites de moitié.

- (c) En acceptant simplement le non déterminisme, la nouvelle transition observée est ajoutée; elle devient aussi probable que les transitions précédemment observées. Cette stratégie ne tient pas compte de l'aspect chronologique des expériences vécues.
- (d) Dans le souci de maintenir le déterminisme et la non-ambiguïté, une taille de traitement variable est considérée.

Du fait qu'il introduit un point de non-déterminisme, l'état sensoriel final du contexte  $c(t-1)$  nécessite une taille de traitement supérieure (incrémentée d'une unité), ce qui implique une remise à jour locale du graphe autour de chaque sommet dont le contexte termine par ce même état sensoriel.

Ces quatre stratégies (a), (b), (c) et (d) fournissent quatre algorithmes possibles d'apprentissage. Les trois premières présupposent une longueur fixe de traitement suffisamment grande pour favoriser le maintien de la non-ambiguïté du graphe alors que la stratégie (d) nécessite une longueur de traitement dynamique assignée à chaque état sensoriel possible, initialisée à la valeur 0 (contexte réduit à une situation, à un état sensoriel ponctuel).

### Apprentissage en décroissance

Les stratégies (a) et (b) ont introduit une forme d'apprentissage "en décroissance" dans le sens où elles retirent ou affaiblissent des transitions qui ne sont pas confirmées par l'expérience. Ainsi,

- La stratégie (a) est une forme draconienne de désapprentissage; seules les dernières expériences laissent une trace dans la représentation, les expériences précédentes depuis le même contexte étant immédiatement oubliées.
- La stratégie (b) correspond à un désapprentissage par oubli progressif; on peut également éliminer, avec cette stratégie, les transitions dont le poids décroît au-dessous d'un seuil préétabli.

Les opérations de retrait d'arcs ne peuvent pas conduire à l'isolement total d'un sommet<sup>10</sup>. Les retraits d'arcs isolés ne sont donc pas possibles.

En revanche, un isolement total peut s'appliquer à toute une partie du graphe.

Dans le graphe ci-dessus (correspondant à l'exemple traité au chapitre 8), imaginons que la transition manquante (entre les contextes  $e2d$  et  $d2c$ ) ne soit pas encore connue. L'agent se trouve probablement dans un contexte de la partie droite du graphe (la dernière transition réalisée entre la partie gauche et la partie droite est celle allant de  $c4d$  à  $d4c$ ). Supposons que l'agent se perde et qu'il lance une phase de relocalisation qui le mène au sommet  $c4d$ ;

<sup>10</sup> En effet, même si l'on retire tous les arcs entrants d'un sommet particulier, ce sommet conserve toujours au moins un arc sortant. Cela reste vrai même si notre dernière visite à ce sommet s'est soldée par une relocalisation; dans ce cas, on ne considère pas la transition réalisée, mais les arcs sortants du sommet ne sont pas remis en question (et il en existe puisque la relocalisation est provoquée par une prévision non vérifiée).

## 9. Les processus cognitifs

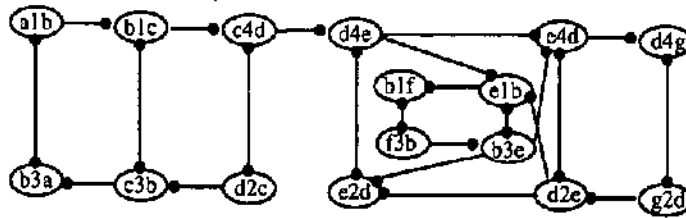


Figure 9.2 : Le graphe sensori-moteur en cours d'acquisition.

il est passé dans la partie gauche. Si maintenant la transition allant de  $c4d$  à  $d4e$  n'est pas vérifiée par l'expérience, l'élimination de cette transition peut aboutir à l'isolement de toute la partie droite du graphe. Le graphe n'est donc plus connexe; il est formé de deux composantes connexes. Dans ce cas, l'isolement de la partie droite est total.

D'autre part, la situation représentée dans la figure 9.2 correspond à un isolement partiel de la partie gauche du graphe; dans ce cas, le graphe est encore connexe mais, pour l'agent, c'est comme s'il s'agissait de deux composantes connexes car, de la partie droite dans laquelle il se trouve, il ne pourra accéder à la partie gauche que s'il observe une transition inédite vers l'un de ses contextes ou si une phase de relocalisation le renvoie dans cette partie (absence de connexité forte). Cette situation apparaît fréquemment au niveau d'un sommet.

Dans un cas comme dans l'autre, on pourrait donc envisager d'éliminer toute la partie du graphe inaccessible. Toutefois, il est préférable de maintenir toutes les composantes connexes afin de les récupérer intégralement par de nouvelles expériences et ne pas avoir à les reconstituer pas à pas.

Ces récupérations massives surviennent régulièrement en pratique, surtout dans des applications où le nombre moyen d'arcs sortants est faible (nombre réduit d'instincts par état sensoriel).

### Expériences

Nous avons implanté et testé les stratégies (a), (b) et (c). De plus, de par le fait que l'agent peut mettre longtemps (plus d'une demi-heure) avant d'avoir expérimenté toutes les transitions d'un environnement tel que celui donné dans notre exemple (en forme de 7), nous n'avons utilisé ces techniques que sur le simulateur. Certains graphes déterministes et non-ambigus obtenus par apprentissage ont ensuite été fournis au robot réel et utilisés par celui-ci.

La stratégie (a), consistant à remplacer immédiatement les transitions non vérifiées, s'est avérée être praticable, malgré la sobriété du traitement. Les bons résultats obtenus sont néanmoins essentiellement dus à la stabilité et à la robustesse des instincts considérés dans nos exemples.

Cette approche permet d'obtenir des graphes déterministes et non-ambigus par construction. Par contre les stratégies (b) et (c) peuvent fournir des graphes non-déterministes. Le nombre de sommets non déterministes est néanmoins réduit; ce résultat dépend à nouveau de la stabilité et régularité des instincts mis en jeu et, dans une moindre mesure, de la nature de l'environnement considéré.

De façon générale, deux remarques peuvent être faites:

- Le type d'apprentissage considéré permet d'acquérir des connaissances de façon immédiate sur la base d'un petit nombre d'expériences; une observation suffit généralement pour laisser une trace souvent définitive dans la connaissance du système.

L'approche est ici différente de celle de la plupart des mécanismes d'apprentissage connexionnistes où la connaissance se forme petit à petit, par approximations successives, sur la base d'un ensemble considérable d'observations.

Intuitivement, le type d'apprentissage que nous utilisons est plus proche des techniques que l'Homme semble utiliser. Quoiqu'il en soit, cette instantanéité de l'acquisition est primordiale pour un agent autonome qui n'a pas le temps de répéter constamment les mêmes opérations pour s'assurer du bien fondé de ses hypothèses.

- D'autre part, il est à noter que les graphes obtenus ne correspondent pas toujours au graphe qui serait "optimal" à nos yeux. Cette constatation serait d'autant plus vraie si les instincts considérés étaient moins stables ou si l'environnement était plus complexe; dans ce cas, nous ne pourrions même pas imaginer ni la forme ni la taille du graphe "optimal".

Néanmoins, les graphes acquis présentant des "imperfections" sont utilisés efficacement par l'agent qui les a acquis; les "imperfections" apparaissent comme étant des régularités pour l'agent. Celui-ci les exploite directement en cours d'apprentissage pour se rendre dans des sommets où certaines expériences restent à faire.

### 9.3.3 Commentaires

Le processus d'apprentissage présenté permet, à l'aide du processus d'interprétation, de structurer l'historique en un graphe représentant la topologie de l'interaction sensori-motrice expérimentée par l'agent. De plus, il le fait de façon synchronique grâce à des traitements locaux uniquement, ce qui permet de l'utiliser dans des applications réelles. Il répond donc bien au problème posé.

Le type d'apprentissage que nous proposons possède des analogies avec le mécanisme élargi de conditionnement tel que celui préconisé par Skinner ou Thorndike. En ce sens, nous exploitons la notion de contiguïté de l'instinct et de son effet, ainsi que celle de renforcement (la stratégie probabiliste (b), en particulier).

Nous nous plaçons à un niveau de complexité supérieur à celui de l'apprentissage sensori-moteur (qui correspondrait à l'apprentissage des instincts) et traitons un niveau symbolique décrivant les capacités sensori-motrices de l'agent et permettant de construire une carte cognitive représentant la structure topologique de l'interaction.

À ce niveau symbolique, nous ne traitons que le sens opératoire des éléments. Rappelons que, malgré le niveau de représentation considéré, l'un des principes méthodologiques de notre travail consiste à éviter l'approche objectiviste. Nous nous situons parfaitement dans le cadre non-objectiviste des cartes cognitives et avons proposé quatre techniques d'acquisition de telles cartes à partir du vécu sensori-moteur. Ces techniques empiriques sont utilisables par l'agent lui-même.

Enfin, le processus d'apprentissage est essentiel dans une perspective d'autonomie car chaque agent emmagasine ses propres et uniques expériences: l'espace physique couvert et le vécu singulier. Chaque agent est également unique par son espace sensori-moteur  $p(S) \times I$  et sa fonction de stimulation  $\mathcal{F}$ .

En particulier, l'environnement perçu par un humain est différent de celui de tout agent artificiel. C'est la raison pour laquelle nous considérons qu'il est inadapté de vouloir donner à l'agent une quelconque représentation a priori, basée sur notre interprétation des choses. Notre point de vue, aussi "exact" soit-il, est trop différent de celui de tout agent artificiel et inadapté à ses capacités. Dans notre architecture cognitive, la connaissance est donc acquise par l'agent lui-même. C'est le processus d'apprentissage qui en a la charge.

Par rapport aux critères d'évaluation ([survie], [rôle social] et [évolution]), le processus d'apprentissage favorise la satisfaction de l'évolution de l'agent. Elle permet à celui-ci de s'améliorer, en répondant différemment à des situations similaires à travers l'exploitation de la trace laissée par une accumulation d'expériences.

Pour terminer, mentionnons que la carte cognitive résultant d'un tel apprentissage n'a pas à correspondre à la carte que nous pouvons imaginer en tant qu'observateurs externes. Elle

### 9. *Les processus cognitifs*

sera même très probablement différente ce qui n'est guère important car l'unique espoir est qu'elle serve à la fonctionnalisation de l'activité de l'agent qui l'a acquise.

Nos expériences ont montré qu'une carte acquise par l'agent aboutit généralement à de meilleurs résultats à l'utilisation que pour une carte fournie; ce qui nous semble être des perturbations prises en compte par l'agent dans sa fonction d'apprentissage s'avère être des régularités "à ses yeux", régularités que nous n'aurions pas pu imaginer.

## 9.4 La motivation

La motivation est souvent considérée comme le premier élément chronologique de la conduite; c'est elle qui déclenche nos attitudes comportementales dans une certaine orientation, par rapport à certains buts internes explicites ou implicites, conscients ou inconscients<sup>11</sup>.

### 9.4.1 Concepts et terminologie

Afin de situer le domaine couvert par le sujet de la motivation, nous allons différencier deux catégories de besoins, les besoins primaires et secondaires, qui semblent motiver l'activité de certains êtres vivants, l'Homme en particulier. Nous insisterons ensuite sur l'importance des variables internes et des mécanismes homéostatiques dans le cadre de la motivation. Nous terminerons par mentionner l'approche hédoniste du comportement.

#### Besoins primaires et besoins secondaires

Physiologiquement, il est reconnu que la motivation est fortement liée aux sécrétions d'hormones par certaines glandes (intéroception, processus endocriniens). Sous cette perspective, la motivation est un mécanisme d'équilibre homéostatique qui tend à déclencher les comportements permettant de combler des déséquilibres internes ou besoins. D'autre part, certains facteurs de motivation proviennent du milieu et agissent sur le cerveau en tant qu'excitants externes.

Il est d'usage de distinguer les *besoins primaires* (tels que la faim, la soif, la fatigue, la libido) des *besoins secondaires* (besoin d'imitation ou besoin d'affiliation au groupe, par exemple).

Les premiers sont considérés comme vitaux; ils utilisent les comportements comme des instruments permettant de réduire le besoin. La plupart des conduites animales seraient essentiellement déterminées par ces besoins. Les attitudes liées aux besoins primaires sont essentiellement innées; elles apparaissent donc dans un processus d'évolution phylogénétique. Enfin, elles sont généralement liées à des activités à court terme.

Les besoins secondaires permettent d'expliquer des comportements moins vitaux mais nécessaires, en particulier, à l'insertion de l'individu dans son milieu physique ou social. Les attitudes liées aux besoins secondaires sont en grande partie acquises empiriquement; elles apparaissent donc dans un processus d'évolution ontogénétique. Enfin, elles sont généralement liées à des activités à long terme.

Remarquons que, dans nos critères d'évaluation, cette dichotomie entre besoins primaires et secondaires apparaît également à travers les notions de survie (l'inné et le court terme) et de rôle social (l'acquis et le long terme).

#### Variables internes et homéostasie

Dans un système artificiel, les besoins primaires peuvent être reflétés par des variables internes qui sont liées à des buts internes gérés par un processus de motivation. La dynamique de ces variables internes permet d'expliquer des comportements différents dans des situations similaires<sup>12</sup>.

La prise en considération par l'agent de ces facteurs internes est un élément essentiel au maintien de son autonomie; ils lui permettent de subvenir à ses besoins vitaux.

Pour la gestion de ces variables internes, l'organisme vivant démontre des capacités homéostatiques lui permettant de maintenir ces variables dans des intervalles de valeurs assurant sa viabilité. Un manque particulier influence les choix comportementaux dans le sens de combler ce manque.

---

<sup>11</sup>Pour un survol des modèles de la motivation proposés par l'éthologie et la psychologie, voir [Toates-Jensen91].

<sup>12</sup>Le fait de se comporter différemment face à une source d'eau selon qu'on aie soif ou non, par exemple.

En robotique mobile, seul Ron Arkin [Arkin92] semble avoir soulevé l'importance de la prise en considération de variables internes et l'utilité de mécanismes homéostatiques permettant à des systèmes autonomes de favoriser leurs contraintes vitales. Tyrrell [Tyrrell93] et Verschure [Verschure-al.92] s'intéressent également aux processus homéostatiques dans des environnements simulés.

Bersini [Bersini94a] s'intéresse, lui, au problème de la gestion des conflits pouvant apparaître entre variables dépendantes devant conserver leurs domaines de viabilité. Des techniques d'apprentissage (*Q-learning*<sup>13</sup>, dans le cas précis) peuvent permettre de trouver des compromis adéquats<sup>14</sup>.

### L'hédonisme

Globalement, l'hédonisme est une philosophie selon laquelle la conduite n'est guidée que par la recherche du plaisir et l'évitement de la douleur.

Ces principes sont sous-jacents au mécanisme de conditionnement béhavioriste; c'est une façon de l'interpréter. Cette interprétation est différente de l'idée de motivation consommatrice cachée derrière la notion de besoin.

Paul Bourguine a repris cette notion et énoncé une hypothèse d'*anticipation hédoniste*, basée sur la donnée d'une fonction hédoniste adaptable par auto-renforcement (*Q-learning*, également). Dans un système artificiel, cette fonction a pour objectif de servir à choisir ses comportements en fonction de l'attente hédoniste qu'elle permet de déterminer.

D'autre part, Cabanac avance dans [Cabanac91] l'hypothèse d'une résolution des conflits entre motivations essentiellement par maximisation du degré de plaisir prévisible. Il propose d'élargir les modèles du comportement en tenant compte de la dimension de plaisir.

Sous une perspective hédoniste, nos deux premiers critères d'évaluation peuvent être interprétés comme suit:

- la *survie* revient à se faire plaisir soi-même, ou plus précisément à éviter la détérioration physique ou énergétique,
- le *rôle social* revient à faire plaisir à autrui (l'hédonisme permet, en effet, d'aller jusqu'à se faire plaisir de façon détournée!).

### 9.4.2 Une approche concrète

Après avoir mentionné certains éléments liés à la capacité de motivation, nous allons préciser le traitement que nous avons fait de ce processus dans le cadre de notre architecture cognitive. Nous commençons par situer notre travail par rapport aux mécanismes que nous venons de présenter. Nous introduisons ensuite la problématique liée au processus de motivation et décrivons la solution proposée par notre travail.

#### Caractérisation

En liaison avec la motivation, il s'agit de bien distinguer les besoins (les buts, les objectifs) de leur gestion.

---

<sup>13</sup>Dans le domaine connexionniste, l'apprentissage par renforcement correspond à une technique consistant à améliorer les performances du système en maximisant progressivement une fonction calculée sur la base d'une succession de réponses numériques reçues de l'environnement. Comme les systèmes de classification (*Bucket Brigade Algorithm* [Holland80]), le *Q-learning* est une méthode d'apprentissage par renforcement; elle a la particularité de permettre l'apprentissage de séquences d'actions sur un horizon temporel donné (voir [Dorigo-Bersini94]).

<sup>14</sup>De façon générale ces problèmes s'inscrivent dans le cadre de l'étude des systèmes dynamiques non déterministes soumis à des contraintes de viabilité (on parle parfois de théorie de la viabilité [Bourguine92, p.32], [Aubin91]):

De même, en ce qui concerne la gestion, il faut distinguer les mécanismes de génération de besoins (l'homéostasie par exemple, qui fait émerger les besoins courants comme étant prioritaires) des mécanismes de satisfaction de besoins (qui permettent d'orienter les choix en tenant compte des besoins courants).

Dans notre architecture cognitive, le processus de motivation doit servir à orienter notre agent pour le court terme, mais également et surtout pour le long terme; c'est ce qui justifie notre approche hybride par rapport à une approche uniquement comportementale (voir chapitres 3 et 4) qui permet de traiter le court terme à travers une activité réactive de nature située.

Nous nous intéressons ici à la gestion de la connaissance (graphe de la topologie de l'interaction) dans le but de tendre à ce que le système puisse satisfaire ses buts par des choix adéquats. Il s'agit de savoir comment atteindre les buts fixés étant donné un état de connaissance. Nous ne traitons pas le problème de savoir comment ces buts parviennent à émerger.

Le graphe, connaissance sur laquelle se base le processus de motivation, peut être vu comme une sorte de fonction hédoniste; c'est lui qui porte la connaissance causale permettant de prévoir, d'anticiper l'effet des choix réalisés. C'est une représentation symbolique et dynamique de ce que pourrait être une fonction numérique, adaptable par auto-renforcement.

De plus, la motivation que nous considérons est multiple et variable<sup>15</sup>; plusieurs besoins peuvent entrer en jeu et ces besoins peuvent varier au cours du temps. Ces caractéristiques font que l'agent puisse

- démontrer une variété de comportements qui le rendent polyvalent et permettent de l'utiliser à des tâches diverses,
- donner des réponses variées dans des circonstances similaires en fonction des buts recherchés (ça n'est pas le cas dans les systèmes comportementaux purement situés).

## Problématique

Dès lors, la problématique liée à notre approche du processus de motivation consiste à

- déterminer la notion de but par rapport aux choix représentationnels que nous avons faits au chapitre 8 (topologie de l'interaction sensori-motrice, notion de contexte),
- proposer un mécanisme permettant d'offrir à l'agent une indication de l'orientation à prendre dans les choix de son activité (fonctionnalisation),
- assurer que ce mécanisme possède des propriétés offrant des traitements efficaces et permettant son utilisation dans des applications réelles.

## Définition du processus

Dans notre architecture cognitive, le processus de motivation peut être défini comme suit:

*la motivation est la détermination contextuelle des régularités de l'interaction qui sont à poursuivre, dans le souci de satisfaire les besoins courants.*

---

<sup>15</sup> Il est courant de trouver des agents dits autonomes (particulièrement les agents situés) qui n'ont qu'un but fixe, pré-programmé, souvent implicite (autant dans le système que dans la tête de son concepteur). Peu de travaux traitent des systèmes multi-motivés: celui de Maes (voir paragraphe 3.7.1), qui fait intervenir une conjonction de buts courants dans le choix des actions, et [Ceconi93], dont la couche d'entrée du réseau de neurones comprend des unités de motivation variables qui déterminent des sorties différentes pour des états perçus identiques, sont deux travaux à peu près isolés de systèmes multi-motivés.

### La nature du besoin

Dans notre travail, la notion de besoin correspond uniquement à celle d'état sensoriel. Les besoins peuvent donc être donnés par le concepteur qui a spécifié l'ensemble des stimuli et des instincts composant le niveau comportemental de l'agent.

La notion de tâche apparaît sous la forme d'une liste de besoins à satisfaire successivement. La tâche peut également être donnée par le concepteur, soit complètement avant le traitement, soit pendant l'exécution. L'agent traite cette liste séquentiellement.

Des définitions plus larges peuvent également être envisagées:

- Au lieu de limiter le besoin à un état sensoriel, on peut l'élargir à la notion de contexte, c'est à dire à une séquence sensori-motrice. Ceci permet en particulier de pouvoir aborder un état désiré par des voies différentes (dans notre exemple illustratif, aborder la jonction par un couloir particulier).
- Ne pas considérer uniquement des conjonctions de besoins traités séquentiellement mais introduire des disjonctions (le besoin 1 ou le besoin 2).
- Imposer le maintien permanent de certains stimuli (sous-états); ceci permet de réaliser certaines tâches sous contraintes. Par exemple, le fait de maintenir toujours un "obstacle sur la droite" quoi que l'on fasse ou de réaliser une tâche en gardant "l'oeil" sur une cible ou encore de suivre un "mur" sans cesser de pousser une boîte.
- Introduire également la notion de rejet partiel ou total: au fait de désirer tel ensemble de stimuli, on ajoute le fait d'éviter tel autre ensemble disjoint du premier. Cette approche s'oppose à la précédente. Elle permet de réaliser des tâches en évitant les contextes contenant des états non désirés.

De plus, les besoins peuvent être liés à chacun des critères d'évaluation ([survie], [rôle social] ou [évolution]). Nous allons voir la nature des besoins dans chacun de ces cas.

### Besoins et survie

Notre définition de l'espace sensori-moteur de l'agent ( $p(S) \times T$ ) n'empêche en aucun cas de considérer des valeurs liées à l'état de certaines variables internes (niveau des batteries, odométrie, nombre de chocs par unité de temps, taux de prévisions satisfaites). Ainsi, un état sensoriel reflète, de façon générale, l'état du milieu et celui de l'agent simultanément (extéro- et intéro-ception).

L'état interne est lié au premier critère d'évaluation; la survie est dépendante de l'évitement de certains états internes et de la recherche et du maintien des états internes favorables. On retrouve les éléments de l'approche hédoniste.

Par opposition aux travaux de Bersini qui s'intéresse à l'acquisition des contraintes entre variables, nous donnons à notre agent des listes de besoins à convoiter ou à éviter. Ainsi, l'agent, quelle que soit sa tâche par rapport au critère de rôle social, peut tenir compte de variables liées à sa survie.

### Besoins et rôle social

Les besoins liés au rôle social (satisfaire seul les tâches qui lui sont attribuées dans la société) sont ceux que nous avons le plus traités et expérimentés.

Une tâche ou un rôle donné à notre agent peut porter sur n'importe quel critère d'évaluation. On pourrait, par exemple, lui demander simplement de veiller à ce que ses batteries ne se déchargent pas en lui donnant les capacités d'aller se recharger [survie]; nous lui demandons alors d'être attentif à son critère de survie.

En revanche, un robot est généralement construit pour réaliser des tâches utiles à son concepteur; en robotique mobile, elles peuvent prendre des formes variées telles que la navigation de zone en zone (robot de surveillance, robot laboureur, robot tondeur à gazon) ou

le transport d'objets (robot postier, robot serveur de cafés, robot rangeur de locaux). Dans ces cas, les besoins sont exprimés en fonction de caractéristiques du milieu observables et reconnaissables par l'agent. Celui-ci utilise essentiellement son extéroception pour ce genre de tâches.

Dans ce contexte de communication entre l'agent (dont on attend la réalisation d'une tâche) et nous (en tant qu'observateurs) il est important de relever que, de par l'approche non-objectiviste, le but se limite à des éléments sensori-moteurs. Nous communiquons en des termes qui nous sont propres mais ces termes ont un sens opératoire pour l'agent, ce qui nous fait dire qu'il s'agit d'un bon langage de communication.

A la limite, le fait de donner plus de liberté (ou d'autonomie) à l'agent en lui permettant de déterminer lui-même son espace sensori-moteur ne permettrait plus de communiquer avec lui. A l'opposé, le fait de lui donner moins de liberté (ou d'autonomie) en lui donnant une connaissance a priori des régularités que nous pensons qu'il est susceptible d'observer, nous ferait introduire une incompréhension ou une difficulté supplémentaire défavorisant la réalisation des tâches désirées. Il s'avère donc que l'approche que nous préconisons est un juste milieu entre le contrôle (hétéronomie) et l'indépendance totale de l'agent; c'est là une façon nuancée de voir l'autonomie.

### Besoins et évolution

Il est plus difficile d'envisager la donnée d'une tâche à l'agent exprimant des besoins liés au critère d'évolution. Or, c'est certainement le type de tâche qu'il reçoit le plus fréquemment.

En effet, l'agent étant constamment à la recherche de nouvelles expériences, la donnée d'un besoin dont il ne connaît pas le contenu le pousse à explorer de nouvelles régularités de son interaction et par conséquent à accroître ses connaissances, la variété de ces choix et sa polyvalence. Simplement, il évolue.

### Les besoins et leur localisation

Le besoin courant étant donné à l'agent, la première phase du processus de motivation consiste à localiser dans le graphe les contextes satisfaisant ce besoin.

Un contexte  $c$  (séquence sensori-motrice de longueur  $2L + 1$ ) satisfait un besoin  $b$  (séquence sensori-motrice de longueur  $k \leq 2L + 1$ ) s'il le contient<sup>16</sup>. Ainsi, étant donné un besoin  $b$ , un contexte candidat  $c$  est celui dont la séquence finale (composée des  $k$  derniers éléments) contient  $b$ .

Il se peut également qu'un besoin ne corresponde à aucun contexte connu. Dans ce cas l'agent ne peut pas le localiser dans le graphe; le besoin est laissé de côté. L'acquisition de nouveaux contextes par l'expérience devrait, tôt ou tard, le faire apparaître.

Enfin, l'extraction de l'ensemble des contextes satisfaisant un besoin particulier permet de déterminer, de façon univoque, l'ensemble des sommets buts à travers le graphe  $G$ .

### Gradient de motivation

Le paragraphe précédent a permis de préciser comment le processus localise les sommets buts dans le graphe  $G$ . Il s'agit maintenant de distribuer à travers le graphe cette information ponctuelle de but. Pour cela, la deuxième phase du processus de motivation utilise une technique de propagation d'activation qui permet d'assigner une valeur d'activation à chaque sommet:

- a) l'activation de chaque sommet est initialisée à 0,
- b) une quantité d'activation déterminée est injectée dans le graphe en chaque sommet but,

<sup>16</sup> Si le besoin exprime également des éléments non désirés, la notion d'inclusion se décompose en inclusion de la partie désirée et exclusion de la partie non désirée.

## 9. Les processus cognitifs

c) cette activation est propagée de sommet en sommet dans le sens inverse des arcs (en arrière, de l'effet à la cause),

d) ceci jusqu'à la vérification d'un critère d'arrêt.

Cette technique simple de propagation peut faire l'objet d'un traitement distribué; le traitement est alors réalisé au niveau de chaque sommet en communication avec ses voisins directs.

Il est à noter que la technique de propagation est totalement indépendante des autres opérations du processus de motivation ou des deux autres processus d'interprétation et d'apprentissage; elle peut être réalisée de façon asynchrone et en continu.

La seule dépendance de cette opération avec les autres réside dans le fait d'être déclenchée au moins chaque fois que l'ensemble des sommets but ou la structure du graphe changent.

L'objectif est d'établir un gradient à travers le graphe qui soit une image de l'état de motivation de l'agent. En contrôlant correctement l'opération, un sommet sera d'autant plus activé qu'il est proche d'un sommet but. Cette notion de proximité est prise dans une acception générale et pas forcément métrique; on peut par exemple pondérer les arcs en fonction de la difficulté de transition entre contextes (statistique de réussites/échecs) ou de la fréquence de transition (chemins bien connus et robustes).

Une caractéristique théorique important de cette technique est d'assurer l'absence de minima locaux qui pourraient attirer l'agent et le bloquer dans des sommets qui ne sont pas des buts.

Enfin, le point (b) de l'algorithme de propagation permet d'envisager des activations externes dont la valeur dépende de l'intensité de chaque but courant.

Cette technique de propagation de gradient est utilisée dans différents domaines de l'IA (réseaux sémantiques, réseaux de propagation de contraintes et de maintenance de la vérité). Les travaux de David Payton et Pattie Maes (décrits au chapitre 3) de même que ceux de Ron Arkin et Maja Mataric (décrits au chapitre 4) présentent d'autres systèmes utilisant un mécanisme similaire pour orienter les choix de leurs systèmes.

### Comportement dynamique global de la propagation d'activation

La technique de propagation d'activation est introduite afin de générer une information utile à l'agent, permettant une orientation effective de ses choix dans le sens d'une satisfaction des besoins courants.

Or, cette propagation nécessite un traitement particulier pour fournir des informations utiles et fiables. Dans ce sens, nous nous sommes intéressés à la dynamique globale de cette activation à travers le réseau.

La théorie donne à ce genre de graphes sur lesquels on propage une activation le nom de *réseau d'influence*. Il s'agit d'un graphe dont les sommets (munis d'un niveau d'activation) s'influencent à travers les connexions. Les poids des connexions déterminent l'influence qu'a un sommet sur ses voisins. Les influences entre les sommets sont dites *internes*, celles provenant d'une source externe sur certains sommets particuliers sont dites *externes*.

L'activation d'un sommet peut être interprétée de différentes façons suivant le domaine d'application: croyance instantanée sur la validité de son contenu, importance en vue d'un traitement ultérieur ou utilité.

Le comportement global d'un réseau d'influences dépend de deux aspects qui sont sa topologie et ses interactions locales (poids sur les arcs). Dans les applications typiques, et c'est le cas chez nous aussi, certains sommets sont initialement activés par une source externe. Ceux-ci propagent leur activation sur leurs voisins qui voient leur activation s'accroître et la propagent sur leurs voisins, donnant lieu ainsi à une dynamique complexe caractérisée par une modulation spatio-temporelle de l'activité globale du réseau.

Sur la base des travaux théoriques de B. Huberman et T. Hogg [Huberman-Hogg87], nous avons construit un algorithme de propagation pour notre application et avons fait une analyse

théorique du comportement de la dynamique globale du système. Cette dynamique est décrite par l'équation

$$A(N) = C(N) + MA(N - 1)$$

où

$A(N)$  est le  $n$ -vecteur dont l'élément d'indice  $i$  représente l'activation du sommet  $i$  au pas  $N$ ,

$C(N)$  est le  $n$ -vecteur spécifiant la quantité d'activation externe injectée en chaque sommet au pas  $N$ ,

$M = (1 - \gamma)I + \alpha R$  est une  $n$ - $n$ -matrice déterminée par la topologie du réseau,  $I$  étant la matrice identité et  $R$  étant la matrice de connexions,  $R_{i,j}$  est le poids de l'arc allant du sommet  $j$  au sommet  $i$  et  $R_{i,i} = 0, \forall i \in \{1, \dots, n\}$  (diagonale nulle car le réseau ne possède pas de boucles),

$\alpha$  est le *facteur d'amplification*, spécifiant la quantité d'activation propagée par un sommet vers tous ses voisins,

$\gamma$  est le *taux de relaxation* qui spécifie la vitesse à laquelle l'activation d'un sommet décroît vers 0, ( $0 < \gamma < 1$ ).

De notre analyse, il ressort que

- la propagation de l'activation peut être contrôlée à l'aide de deux paramètres uniquement ( $\alpha$  et  $\gamma$ ),
- la dynamique d'activation possède un régime asymptotique aussi bien global (activation totale) que local (activation en chaque sommet). Le maintien de certaines contraintes sur les paramètres permet d'assurer la convergence du processus de propagation vers un état stable d'activation (pour atteindre un point fixe de l'équation, il suffit de maintenir  $\gamma > \alpha$ ),
- on peut déterminer le temps de convergence (en cycles d'algorithme) selon certains critères et en fonction des paramètres choisis,
- il est donc possible de borner le temps de convergence en contraignant les valeurs des paramètres,
- l'accélération du processus de convergence n'affecte pas qualitativement la forme du gradient généré: quelle que soit la valeur effective d'activation en chaque sommet du graphe à la fin de la propagation, des chemins implicites sont créés menant de tout sommet au but le plus "proche",
- si le graphe est maintenu connexe par construction, il suffit de  $n$  pas d'algorithme ( $n = \text{ordre}(G)$ ) pour assurer que tout sommet du graphe soit atteint par la vague d'activation.

En résumant ces propriétés, il est possible, par un choix adapté des deux paramètres de l'algorithme ( $\alpha$  et  $\gamma$ ), d'assurer la génération implicite de chemins convergents vers les buts, en un temps borné et contrôlable.

### 9.4.3 Commentaires

A travers le traitement proposé, l'algorithme de motivation répond favorablement à la problématique que nous avons établie:

- Il permet d'assigner une information au niveau de chaque sommet du graphe (l'activation) permettant un traitement local du choix de la transition dans le sens d'une orientation vers les sommets buts (par la technique de propagation du gradient).

## 9. Les processus cognitifs

- Il permet également un traitement efficace (qui peut être distribué); ceci a permis d'intégrer ce processus efficacement dans notre architecture cognitive et de l'utiliser dans des applications réelles.

Ce processus de motivation est essentiel dans notre architecture cognitive dans le sens où il gère la finalité; il donne l'orientation à long terme. En ce sens, il constitue un outil de décision pour l'agent, le moteur de la fonctionnalisation de son activité.

Nous avons vu que la notion de besoin peut s'exprimer de façon très variée: de l'état sensoriel au contexte sensori-moteur, d'une conjonction de besoins à des conjonctions de disjonctions, enfin dans le sens d'une recherche, d'une répulsion ou d'une convoitise par rapport à certains besoins.

Le besoin peut également être lié à chacun des critères d'évaluation: à la *survie* par des états internes (intéroception et proprioception), au *rôle social* par des états externes (extéroception) et à l'*évolution* par des états que l'agent ne connaît pas encore (il explore pour les trouver et évolue par effet de bord).

En ce qui concerne le mécanisme de propagation, il est important de constater qu'une fois l'activation stabilisée, le mécanisme de motivation (localisation des sommets buts + propagation) n'a besoin d'être déclenché que si les besoins ou la structure du graphe changent. Une fois la propagation réalisée, celle-ci laisse une trace de motivation (le gradient) qui n'a plus besoin d'être modifiée, même si l'agent se perd et doit se relocaliser.

De plus, le mécanisme de motivation peut se dérouler indépendamment du reste des processus. Il fournit à tout moment une image globale de la motivation de l'agent, répartie à travers tout le graphe. L'orientation donnée par le gradient peut être utilisée même si le processus de propagation n'est pas terminé; dans ce cas, l'information, bien que non-stabilisée, est également valable (*any-time algorithm*).

Enfin, une analyse détaillée du comportement global de la dynamique d'activation a permis d'assurer des propriétés importantes sur la nature et le temps de convergence.

## 9.5 La fonctionnalisation

La fonctionnalisation résulte de la coordination des trois processus cognitifs autour de la représentation de la topologie de l'interaction qu'ils partagent.

En introduction et au travers de toute cette thèse, nous avons présenté la fonctionnalisation comme étant l'exploitation contextuelle et systématique des propriétés d'action en vue de satisfaire les critères d'évaluation ([survie], [rôle social] et [évolution]).

Afin de permettre une approche algorithmique de la fonctionnalisation et après avoir introduit les trois processus cognitifs qui la supportent, cette capacité peut se définir comme le contrôle (le choix, la sélection) de l'activité sur la base d'une

*exploitation des régularités retenues par le processus d'interprétation en fonction des régularités poursuivies par le processus de motivation, étant donné un état de la connaissance maintenu et enrichi par le processus d'apprentissage.*

Remarquons que cette caractérisation n'est pas sans rappeler la définition du problème de la génération de plans d'actions. Dans ce cadre, notre système peut être vu comme un exemple de planification réactive.

Pourtant, dans notre modèle, nous considérons la fonctionnalisation de l'activité comme étant une capacité essentielle à l'autonomie d'un agent. Dans ce cadre, notre objectif est de donner une solution efficace et complète au problème de la sélection d'actions.

De plus, nous ne considérons pas la fonctionnalisation comme un processus cognitif supplémentaire; elle est le résultat d'une intégration adaptée, autour d'une connaissance commune, des trois processus d'interprétation, d'apprentissage et de motivation.

Dans la suite, nous précisons le traitement auquel se limite la fonctionnalisation de par l'adéquation de la coopération des trois processus cognitifs. Nous abordons également les cas où cette coopération n'est que partielle et peut conduire à bloquer la capacité de fonctionnalisation; dès lors, nous proposons plusieurs stratégies par lesquelles le système peut tendre à rétablir cette capacité sans cesser d'agir et même grâce au maintien de cette activité.

### 9.5.1 Fonctionnalisation générale

L'apprentissage maintient la cohérence du graphe  $G$  par rapport à l'expérience accumulée à travers le vécu sensori-moteur. L'interprétation permet de déterminer le contexte courant et donc le sommet du graphe  $G$  dans lequel se trouve l'agent. Enfin, la motivation localise les sommets contenant les buts courants et propage un gradient d'activation à travers tout le graphe.

Dans ce cadre, la fonctionnalisation se résume à choisir et sélectionner l'instinct porté par l'un des arcs menant du sommet courant au sommet voisin le plus activé. La fonctionnalisation est donc réduite à un traitement local, extrêmement simple. En effet, le sommet voisin choisi est, de par son degré d'activation, le plus prometteur dans la perspective d'une activité à long terme permettant de satisfaire les buts. La figure 9.3, schématise la situation.

Les sommets voisins du sommet courant  $x$  sont connus de  $x$ . Parmi ces sommets candidats, il s'agit d'extraire le sommet  $x_j$  d'activation maximale. En cas d'égalité, un choix aléatoire parmi les sommets les plus activés est réalisé. Il s'agit ensuite de déterminer l'ensemble des arcs  $u$  menant de  $x$  à  $x_j$ , d'en choisir un,  $u_k$ , et de déterminer l'instinct  $i$  qu'il porte. Cet instinct est l'instinct sélectionné.

### 9.5.2 Fonctionnalisations partielles

La fonctionnalisation, telle que nous l'avons décrite ci-dessus, s'inscrit dans un souci d'autonomie; en orientant les choix de l'agent dans le sens d'une satisfaction des besoins traités par le processus de motivation. Or, ce traitement local et simple n'est pas toujours possible. Il suffit

## 9. Les processus cognitifs

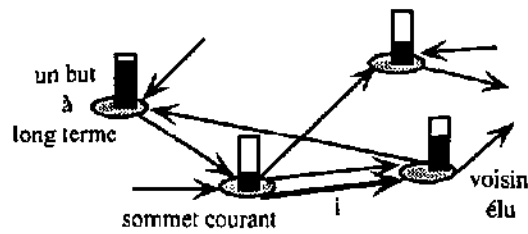


Figure 9.3 : Traitement local de la fonctionnalisation.

que la contribution de l'un des processus fasse défaut pour que la fonctionnalisation ne puisse se produire. Nous distinguons trois cas suivant que l'un ou l'autre des processus ne fournit pas une contribution suffisante:

- a) Le contexte courant  $x$  n'est pas déterminé de façon univoque dans le graphe.**  
Dans ce cas la fonctionnalisation choisira l'activité en utilisant des stratégies favorisant la localisation de l'agent. Il s'agit de fonctionnaliser pour se relocaliser.
- b) Aucune transition n'a encore été expérimentée depuis le sommet du graphe correspondant au contexte courant.**  
Dans ce cas, la fonctionnalisation va mettre en oeuvre des stratégies d'exploration. Il s'agit de fonctionnaliser pour explorer et enrichir sa connaissance (la connectivité du graphe).
- c) Aucun besoin n'est présent dans le graphe, ce qui a pour effet de conserver l'activation de tous les sommets à la valeur 0. Ce cas peut se produire lorsqu'aucun contexte ne permet de satisfaire les besoins courants. Dans ce cas, il s'agit de fonctionnaliser pour pouvoir enrichir la variété des contextes connus afin de favoriser la bonne marche du processus de motivation.**

Ces trois cas peuvent apparaître séparément ou simultanément (lorsque le vécu de l'agent est encore vide, par exemple). Dans tous les cas de figure, il s'agit de fonctionnaliser dans le sens de satisfaire le résultat devant être apporté par l'un des processus en vue de permettre une fonctionnalisation générale.

Nous allons préciser chacune des stratégies.

### Fonctionnalisation d'interprétation

L'agent peut fonctionnaliser par souci d'interprétation; lorsque la situation est ambiguë, que le contexte n'est pas déterminé de façon univoque, l'agent peut orienter le choix de son activité de façon à préciser le contexte et ainsi favoriser sa localisation.

Un traitement particulier peut être réalisé pour optimiser ce type de fonctionnalisation; il s'agit de choisir l'instinct dont on peut prévoir un effet de plus grande désambiguïsation.

Soit  $p$  l'état sensoriel observé. Il s'agit de choisir un instinct parmi  $\mathcal{F}(p)$  dont la destination prévue depuis chacun des contextes connus pouvant correspondre à l'observation  $p$  soit la plus discriminante.

### Fonctionnalisation d'apprentissage

L'agent peut fonctionnaliser par souci d'apprentissage; lorsque certaines actions n'ont pas été expérimentées depuis un contexte donné, il peut orienter son choix dans le sens d'une exploration, afin d'accroître ses connaissances et sa capacité de prédiction. C'est le cas au début de

son vécu, lorsqu'il n'a aucune connaissance et, par la suite, lorsqu'il désire vérifier la stabilité des connaissances acquises.

Il s'agit simplement, étant dans un contexte  $c$ , de choisir un instinct (stimulé par le dernier état sensoriel de  $c$ ) qui ne soit porté par aucun arc sortant du sommet correspondant à  $c$  ou qui soit porté par un arc dont on peut douter de l'effet.

### Fonctionnalisation de motivation

Enfin, l'agent peut fonctionnaliser par souci de motivation; si aucun contexte connu ne permet de satisfaire les besoins courants, il s'agit d'explorer pour en trouver.

Le traitement est similaire à celui de la fonctionnalisation d'apprentissage; il s'agit également d'une exploration. Néanmoins, dans le cas de la fonctionnalisation de motivation, l'agent cherche plus à découvrir de nouveaux contextes qu'à expérimenter de nouvelles transitions.

### 9.5.3 Commentaires

Nous avons vu comment, par une intégration adéquate et une collaboration des trois processus cognitifs autour d'une connaissance commune, la capacité de fonctionnalisation résulte en un traitement simple, local (voisinage immédiat sur le graphe) et réactif (pouvant donner une réponse à tout moment).

Ainsi, notre système apparaît comme une solution au problème de la sélection d'actions. Quatre modes de fonctionnalisation ont été différenciés:

- La première agit dans le souci de faciliter l'interprétation; elle recherche la cohérence morphologique et favorise la capacité d'abduction.
- La seconde favorise l'apprentissage; elle recherche la cohérence causale et assure l'évolution du système.
- La troisième favorise la motivation; elle recherche des objectifs inédits et favorise la polyvalence de l'agent.
- La quatrième, la fonctionnalisation proprement dite, n'apparaît que si les processus cognitifs sont aptes à fournir leur contribution; elle exploite le résultat de ces processus et favorise, par les choix réalisés, la survie de l'agent, la satisfaction de son rôle social ainsi que son évolution.

Ces quatre modes de fonctionnalisation de l'activité correspondent à différentes stratégies dans le choix des instincts de l'agent. En apportant ces stratégies aux processus cognitifs qui la génèrent, la fonctionnalisation se maintient partiellement et se favorise elle-même; il s'agit d'un processus auto-catalytique, se régénérant lui-même, de façon naturelle et par son propre traitement. Ce sont donc quatre facettes d'une seule et unique fonctionnalisation (exploiter l'activité dans le sens d'une satisfaction des critères d'évaluation).

Par rapport aux différentes dynamiques d'interaction apparaissant dans l'architecture ARCO, nous avons vu comment les trois processus cognitifs et la capacité de fonctionnalisation qui en émerge alimentent la boucle cognitive (interne) et la boucle de fonctionnalisation (externe). Cette dernière hérite des propriétés des processus cognitifs. En particulier, elle est déclenchée par un phénomène de *breakdown* (comme l'interprétation), elle est évolutive (par l'apprentissage) et réactive (par la capacité à fournir une orientation à tout moment grâce au processus de motivation).

D'un point de vue algorithmique et dans le cadre des mécanismes de résolution de problèmes proposées par l'IA, la fonctionnalisation peut être vue comme un exemple de planification réactive. Elle résulte néanmoins du traitement d'une problématique plus exigeante qui est celle de la sélection d'actions dans le cadre de la modélisation d'un agent autonome.

Ainsi, la fonctionnalisation résulte d'une bonne intégration et d'un compromis adéquat entre

### 9. Les processus cognitifs

- différents niveaux d'abstraction dans la modélisation de l'agent autonome,
- une connaissance représentant la topologie de l'interaction sensori-motrice de l'agent avec son milieu, abordée sous la méthodologie non-objectiviste,
- trois processus s'occupant de l'interprétation, de la structuration et de la gestion de cette connaissance,
- un ensemble de stratégies permettant de tendre vers une fonctionnalisation adéquate de l'activité (ce qui est notre définition de l'autonomie).

Enfin, l'intégration de tous ces ingrédients nous a permis d'appliquer notre modèle à la robotique mobile dans des expériences concluantes.

*Modélisation d'un agent autonome*

# Expérimentation

Ce chapitre décrit quelques unes de nos expériences réalisées avec le robot mobile Nomad-200 et le simulateur qui lui est associé. Certains résultats ont déjà été introduits ponctuellement dans le texte pour compléter ou appuyer la démarche adoptée dans la phase de modélisation. Ils sont un complément à ce que nous allons exposer.

Il s'agit d'évaluer ici les capacités du modèle à synthétiser le type d'autonomie que nous convoitons. En particulier, il nous faut vérifier si la capacité de fonctionnalisation dont nous dotons le robot permet de satisfaire les critères d'évaluation énoncés en introduction: la survie, le rôle social, l'évolution.

En effet, rappelons que seul un point de vue externe nous permet de juger des compétences du robot. Le point de vue interne a été introduit et utilisé pour modéliser les compétences qui nous semblent nécessaires pour que l'agent puisse manifester, de façon externe cette fois, des propriétés d'autonomie.

Nous allons succinctement décrire l'agent comportemental utilisé et l'environnement de travail que nous avons développé pour cette expérimentation.

## 10.1 Spécifications

Rappelons que les éléments propres à l'architecture ARCO ont été développés dans un environnement UNIX, autour du concept de tableau noir (voir chapitre 5).

Le niveau comportemental accueille essentiellement des instincts implantés en C (bien que ceux utilisés ici soient écrits en LISP), et le niveau cognitif a été développé en CLOS (*Common Lisp Object System*).

Chaque instinct correspond à un processus UNIX différent. Par contre, les trois processus cognitifs s'exécutent sur un seul processus UNIX; à chaque cycle, les traitements propres à l'interprétation, à l'apprentissage et à la motivation sont réalisés séquentiellement, bien qu'une exécution distribuée soit envisageable<sup>1</sup>.

### 10.1.1 L'agent cognitif

Nous avons implanté le modèle cognitif en CLOS, ce qui nous a permis de bénéficier des avantages de la programmation orientée objet. En particulier, les différents algorithmes d'apprentissage testés n'ont demandé qu'une re-définition des méthodes spécifiques à chacun d'eux. L'héritage multiple a été particulièrement exploité pour la spécification des classes liées à la structure de graphe et à la notion de contexte.

<sup>1</sup>Le choix d'un processus unique pour le niveau cognitif a été motivé par la lourdeur de l'environnement LISP (nous ne pouvions lancer qu'un processus LISP par station de travail). Ainsi, bien que LISP permette de gérer un pseudo-parallélisme, le traitement de chacun des processus cognitifs étant "léger", nous avons préféré éviter le *overhead* inhérent à la gestion du pseudo-parallélisme et avons adopté l'approche séquentielle dont le temps de cycle s'est avéré être largement suffisant par rapport à la réactivité des instincts contrôlés; un cycle de processus cognitifs dure environ une seconde, avec un récupérateur (*garbage collection*) demandé explicitement à chaque cycle pour éviter les interruptions longues (de l'ordre de plusieurs secondes) qui peuvent, dans le cas contraire, intervenir sporadiquement.

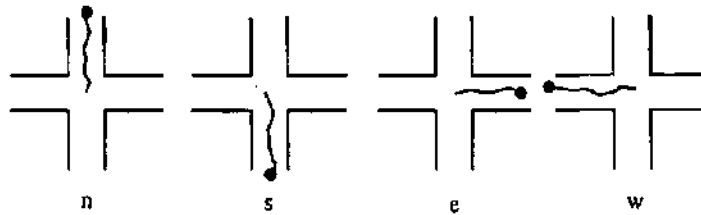


Figure 10.1 : Exemples de trace laissée par les quatre instincts possibles du robot.

Doté de cet appareil cognitif général, notre agent est prêt à accueillir une quelconque base comportementale.

### 10.1.2 L'agent comportemental

Les comportements utilisés pour ces tests sont ceux de l'exemple illustratif que nous avons repris tout au long des chapitres précédents. Ils sont décrits au paragraphe 7.4.1. Nous allons simplement décrire la couche comportementale à l'aide de notre formalisme. La variable  $X$  correspondant à l'un des quatre instincts décrits et  $x$  correspondant à l'un des quatre stimuli associés, nous avons

$$\begin{aligned}
 S &= \{N, S, E, W\}, I = \{n, s, e, w\} \\
 \mathcal{F} &: \wp(S) \longrightarrow \wp(I) - \{\emptyset\}, \\
 \mathcal{F}(\{x, y, z\}) &= \{\mathcal{F}(x), \mathcal{F}(y), \mathcal{F}(z)\}, \text{ avec} \\
 \mathcal{F}(N) &= n, \mathcal{F}(S) = s, \mathcal{F}(E) = e, \mathcal{F}(W) = w.
 \end{aligned}$$

Nous considérons que l'agent est continuellement stimulé par au moins l'une des quatre directions de navigation. En pratique, cette hypothèse peut être contredite. Ainsi, nous avons introduit un instinct de secours qui fait bouger le robot à faible vitesse, sans tendance fixe, mais en évitant les obstacles. Cet instinct n'est pas représenté au niveau cognitif. Il est utilisé par les quatre instincts de navigation lorsque leurs données capteurs semblent trop perturbées. Pour ces instincts, le fait de faire appel à l'instinct de secours peut être vu comme une phase où le mouvement se fait "les yeux fermés", afin de récupérer des données plus cohérentes (récupérer le stimulus perdu, par exemple).

La figure 10.1 montre la trace sur le simulateur laissée par le robot depuis un croisement à 4 couloirs suivant l'instinct sélectionné par le niveau cognitif.

### 10.1.3 Le milieu

Le milieu choisi pour ces tests est également celui de l'exemple illustratif. Rappelons que le graphe extrait par l'agent de son interaction dans un tel milieu comporte une vingtaine de sommets et une trentaine d'arcs; la dimension d'un tel graphe rend les expériences d'acquisition et d'utilisation du graphe suffisamment longues pour ne pas envisager d'environnement plus complexe (un labyrinthe, par exemple) pour cet agent comportemental.

Ce milieu est réel; les conditions de luminosité, la nature des obstacles, la largeur et la longueur des couloirs n'y sont pas uniformes et ils peuvent être parcourus par des personnes du laboratoire qui ne prêtent pas attention au robot. Nous avons essentiellement mené nos expériences dans des couloirs délimités par des planches (ceci réduit les perturbations qui peuvent se présenter). Néanmoins, des expériences similaires ont été menées dans les vrais couloirs de notre laboratoire et ont donné des résultats de stabilité similaire. Ainsi, le robot est plongé dans des conditions de travail que l'on peut qualifier de réalistes.

## 10. Expérimentation

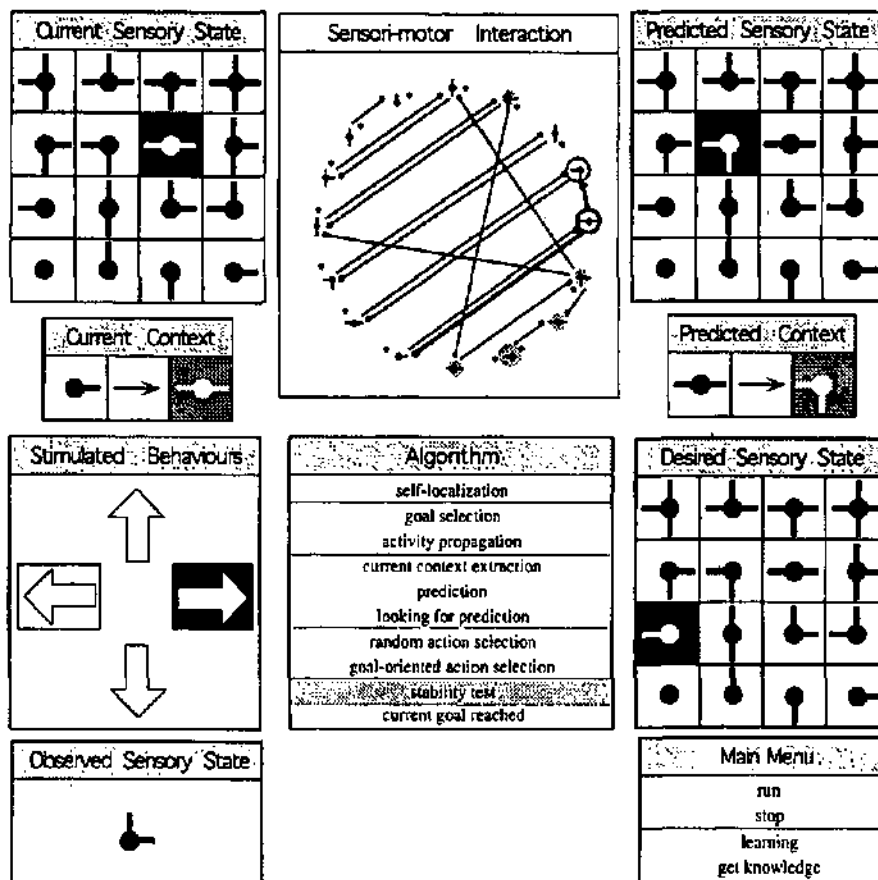


Figure 10.2 : Aspect de l'interface du programme d'expérimentation.

### 10.1.4 Les besoins de l'agent

Les besoins ou buts que nous pouvons donner à un tel agent comportemental dans cet environnement particulier sont un ensemble d'états sensoriels à atteindre successivement. A nos yeux, ces états correspondent à différentes zones de l'environnement.

Nous n'avons pas expérimenté le rejet de certains stimuli, du fait que le traitement des états rejetés n'a pas été développé dans le processus de motivation; nous aurions par exemple pu introduire un stimulus "choc" (en utilisant les données provenant des *bumpers*) et demander à l'agent d'éviter les états sensoriels contenant ce stimulus, quelle que soit la tâche réalisée. Il s'agit néanmoins d'une extension possible.

### 10.1.5 Environnement d'expérimentation

Une interface a été développée pour cette application particulière. Elle nous a permis de visualiser l'état interne et les décisions du robot en cours d'exécution.

La figure 10.2 montre une vue de cette interface telle qu'elle apparaît à l'écran<sup>2</sup>. A chacune des quatre orientations de stimulation est attribuée une couleur. On retrouve ces couleurs dans les stimuli et dans les instincts correspondants.

Toute la partie gauche de l'écran indique des *informations courantes*:

<sup>2</sup>La vue d'origine est en couleur.

## Modélisation d'un agent autonome

- le cadre le plus bas indique l'état sensoriel observé par le robot; il est extrait de l'information fournie par les instincts,
- le cadre du haut indique l'état sensoriel courant (le dernier de l'historique); l'état observé n'accède au statut d'état courant qu'à travers le filtrage réalisé par le processus d'interprétation,
- le deuxième cadre depuis le bas indique par un cadre les instincts possibles depuis l'état courant (donné par  $\mathcal{F}$ ) et l'instinct sélectionné par la fonctionnalisation (encadré en noir),
- enfin, le deuxième cadre depuis le haut indique le contexte courant; ici, la dernière séquence de longueur 3 tirée de l'historique.

Le cadre du centre en haut représente le *graphe* correspondant à l'interaction. On y distingue

- les sommets affichant le dernier état sensoriel du contexte correspondant<sup>3</sup>,
- les arcs dont la couleur indique l'instinct qu'ils portent,
- le sommet courant entouré d'un cercle gras,
- le sommet prévu entouré d'un cercle fin et
- le niveau d'activité de chaque sommet, indiqué par le diamètre du disque noir centré en chaque sommet.

Les transitions connues depuis le sommet courant sont représentées par des traits plus épais. Ce cadre sert à visualiser la topologie de l'interaction tant que le nombre de sommets du graphe reste raisonnable (c'est le cas pour notre application). On peut le fermer dans les autres cas.

Toute la partie droite de l'écran indique des *information futures*:

- le cadre du haut indique l'état sensoriel prévu; fonction de l'état du graphe, du contexte courant et de l'instinct sélectionné,
- le deuxième cadre depuis le haut indique le contexte prévu; l'état sensoriel courant, l'instinct sélectionné et l'état sensoriel prévu,
- le deuxième cadre depuis le bas indique le but courant que l'utilisateur peut sélectionner à l'aide de la souris.

Enfin, le cadre du centre, en bas, indique les différentes étapes de l'algorithme (test de stabilité de l'état sensoriel observé, propagation d'activation, restructuration du graphe) et fait ressortir l'étape courante<sup>4</sup>. Le cadre en bas à droite permet de lancer et d'arrêter les différents types d'expériences que nous allons décrire dans la suite.

---

<sup>3</sup>Rappelons que la taille de traitement des contextes dans cette application est maintenue fixe à la valeur 1 (trois informations: deux états sensoriels successifs et l'instinct ayant permis la transition). Une taille de traitement inférieure (0, c'est à dire un seul état sensoriel par contexte) mène rapidement à des graphes ambigus.

<sup>4</sup>Comme le temps de cycle de l'algorithme implantant le niveau cognitif est proche d'une seconde, nous avons dû introduire des "boucles vides" (*sleep time*) pour permettre de visualiser la succession des étapes de l'algorithme.

## 10.2 Phases d'expérimentation

Nous avons expérimenté le système en deux phases:

Dans la première, nous nous sommes intéressés au *processus d'apprentissage*. Nous avons voulu analyser empiriquement la complexité des graphes acquis, la stabilité de ces graphes (variabilité entre deux expériences), les différences des graphes acquis par rapport au graphe que nous aurions extrait de la projection de notre vue du milieu sur l'espace sensori-moteur du robot (voir figure 8.4), enfin, la mise à jour des connaissances acquises en fonction des modifications que nous faisons subir au milieu en cours d'expérimentation. Ces expériences ont été réalisées sur le simulateur<sup>5</sup>.

La seconde phase porte sur les performances de la *fonctionnalisation*. Nous avons expérimenté la satisfaction de séquences de buts donnés (rôle social) sur une connaissance pré-acquise et non évolutive. Cette phase a été expérimentée sur le robot réel.

Ces expériences susciteront quelques remarques générales quant à la satisfaction des critères d'évaluation et un bilan de l'expérimentation.

## 10.3 L'apprentissage

Dans cette première phase d'expérimentation, seule la fonctionnalisation partielle d'apprentissage est opérationnelle; le niveau cognitif adopte donc une stratégie d'exploration qui fait aller l'agent dans les contextes où il reste des instincts à expérimenter.

Remarquons que cette capacité d'exploration utilise le processus de motivation; l'agent choisit dans le graphe un sommet dont le contexte possède des instincts non expérimentés et qui devient le sommet but à partir duquel l'activation est injectée et propagée à travers le graphe pour générer le gradient permettant à l'agent d'atteindre ce sommet.

Le processus d'interprétation est également utilisé; pour se diriger vers les sommets dont certains arcs sortants sont à explorer, l'agent a en effet besoin de se localiser pas à pas. Il est à noter qu'en phase d'apprentissage, si l'état sensoriel prévu n'est pas vérifié, on ne relance pas une phase de localisation, on modifie le graphe (on doute de la connaissance et non de l'observation).

Ainsi, pour la tâche d'apprentissage uniquement, nous voyons que les trois processus collaborent déjà. En fait, le cas de la fonctionnalisation générale est similaire et même plus simple; dans ce cas, ce n'est pas l'agent qui choisit ses sommets buts à explorer, on les lui indique en donnant une tâche faite d'états sensoriels à atteindre.

Les trois algorithmes d'apprentissage conservant fixe la taille de traitement du contexte ont été expérimentés; rappelons que

- (a) le premier détruit immédiatement les transitions non vérifiées et introduit celle observée; il maintient le graphe déterministe,
- (b) le second accepte le non déterminisme en annotant les arcs d'une pondération reflétant l'ordre d'expérimentation des transitions (plus la pondération est élevée et plus l'expérimentation de la transition est récente),
- (c) le troisième accepte également le non-déterminisme mais sans aucune annotation; toutes les transitions observées depuis un contexte à l'aide d'un même instinct sont équiprobables.

---

<sup>5</sup>Si le fait de travailler en simulation nous a certainement fait gagner du temps dans l'acquisition des graphes (cela évite d'interrompre l'expérience pour recharger les batteries régulièrement), nous ne pensons pas avoir considérablement simplifié les conditions de travail (perturbations, bruit); en effet, la stabilité des instincts est globalement similaire en simulation et sur le robot réel.

Nous avons exécuté les algorithmes suffisamment longtemps pour pouvoir observer l'évolution de l'acquisition et de la perte de connaissances. Aucun critère d'arrêt n'a donc été introduit.

Les instincts étant particulièrement stables, nous n'avons observé que rarement des sommets non déterministes au cours des apprentissages faits par les algorithmes (b) et (c). Ainsi, globalement nous pouvons considérer que les trois algorithmes ont présenté les mêmes performances; ils se sont tous trois avérés concluants.

### 10.3.1 Observations

Les observations générales que nous pouvons faire sur l'ensemble des trois algorithmes sont les suivantes:

- le temps d'apprentissage du graphe est similaire d'une épreuve à l'autre et d'un algorithme à l'autre; nous n'avons pas observé d'épreuve parfaite, ni d'épreuve catastrophique. Elles sont néanmoins presque parfaites du fait que ...
- les connaissances acquises sont stables; peu de transitions acquises sont éliminées (a) ou mises en doute (b),
- les graphes obtenus d'épreuve en épreuve sont très similaires en nombre de sommets et d'arcs, mais surtout par rapport à leurs contenus (contextes et transitions contextuelles). Un contexte insolite à nos yeux était soit isolé par l'agent dès la tentative suivante de le visiter, soit maintenu longtemps dans le traitement, car il réapparaissait comme étant une régularité pour l'agent,
- les graphes dont nous avons constaté la stabilité d'épreuve en épreuve sont également très similaires à celui que nous pouvons considérer comme optimal à nos yeux; seul un ou deux sommets sur la vingtaine traitée possédaient des contenus inattendus,
- la capacité de structuration de la connaissance démontrée par l'agent est patente. La satisfaction du critère d'évolution est vérifiée.

De plus, les épreuves où nous avons laissé l'agent construire la totalité du graphe nous ont permis de constater que la connaissance acquise était rarement remise en cause; lorsque cela arrivait, l'agent récupérait son état stable assez rapidement (souvent dès le passage suivant dans le contexte instable).

Une série de tests a également permis de constater les récupérations de certaines parties du graphe après une intervention de notre part ayant modifié l'environnement et rétabli l'état initial (voir paragraphe 9.3.2).

## 10.4 La fonctionnalisation

La deuxième phase de tests avait pour objectif de vérifier l'adéquation de la fonctionnalisation. Il s'agissait, à travers de quelques expériences de vérifier

- l'efficacité de la fonctionnalisation pour différentes tâches données sur une connaissance complète et figée,
- les résultats obtenus à partir d'une connaissance acquise complètement par l'agent et d'une connaissance donnée par nous.

La fonctionnalisation utilisant également les trois processus cognitifs, l'expérience est très similaire à celle de l'apprentissage. Les différences essentielles sont:

## 10. Expérimentation

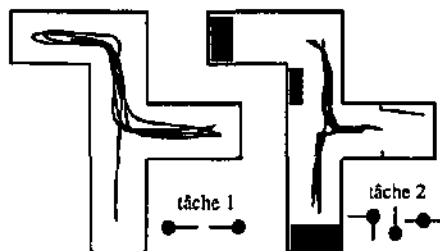


Figure 10.3 : Traces laissées par l'agent dans la réalisation de tâches circulaires.

- les sommets buts ne sont pas choisis par l'agent mais par nous, observateurs, qui lui donnons des tâches à réaliser (cette différence tend même à simplifier le problème),
- plusieurs sommets buts peuvent être considérés simultanément,
- le processus d'apprentissage étant interrompu dans cette phase d'expérimentation, seule l'observation peut être mise en doute et non la représentation; on fait donc intervenir la capacité de localisation.

Ainsi, vu la similarité des mécanismes mis en jeu dans ces deux types d'expériences, les résultats observés en phase d'apprentissage suffisent à expliquer la qualité des résultats également constatés en phase de fonctionnalisation.

### 10.4.1 Observations

Nous avons expérimenté le traitement de tâches données sous la forme de plusieurs séquences d'états sensoriels apparaissant dans le graphe traité par l'agent. La figure 10.3 représente la trace laissée par l'agent pour deux tâches différentes. Cette figure démontre également la réactivité et la flexibilité du traitement comportemental de notre agent; même si l'environnement est modifié sans porter atteinte à la topologie de l'interaction, l'agent adapte son mouvement et continue à fonctionnaliser correctement pour parvenir à réaliser la tâche. En fait, si l'environnement métrique a changé, l'environnement topologique est resté identique. De même, si la trace géométrique de l'agent est légèrement différente, la topologie de son interaction reste la même; l'agent continue à percevoir les mêmes séquences sensori-motrices.

Enfin, ces épreuves ont permis de vérifier la satisfaction du critère d'évaluation lié au rôle social de l'agent. Le mécanisme lié au critère de survie étant identique, nous considérons qu'il peut également être vérifié.

## 10.5 Commentaires

Lors de la conception du modèle et lors de l'implantation des algorithmes liés aux instincts et aux processus cognitifs, nous n'espérions pas obtenir de si bons résultats. En effet, les instincts ont été longuement testés individuellement et paramétrés mais, leur traitement étant de nature située et basé sur des données bruitées (même sur le simulateur), les traces laissées par l'agent en réalisant ces instincts ne semblaient pas suffisamment stables; tout poussait à croire que cette instabilité dans le mouvement conduirait à une absence de régularités dans l'historique observé. Or, l'expérimentation a démontré le contraire.

Nous expliquons la raison de ce succès par la conjonction de deux caractéristiques:

- D'une part, l'espace sensori-moteur de l'agent comportemental considéré est limité; un espace plus riche provoquerait des variations plus fréquentes de l'état sensoriel observé et conduirait probablement à des imperfections plus nombreuses.
- D'autre part, les stimuli ont été bien choisis. Ils sont nécessaires et suffisants pour des tâches de navigation dans le type d'environnement considéré; en effet, le fait de considérer ces quatre stimuli de base permet d'aboutir à une discrétisation de l'espace de navigation en termes de deux états sensoriels génériques qui sont la *jonction* et le *corridor*. Ces deux abstractions (compositions de stimuli élémentaires) sont nécessaires et suffisantes pour exprimer des plans linguistiques du genre "aller jusqu'au prochain croisement", "longer le corridor en direction du sud" puis, au croisement suivant, "emprunter le corridor de droite".

Ce choix précis et minimaliste des caractéristiques nécessaires à la navigation en espace structuré est longuement développé par Yoel Gat dans le cadre de sa thèse (voir [Gat94]).

Ces résultats viennent également confirmer nos attentes dans le cadre d'une approche constructiviste de la connaissance:

- D'une part, le fait de choisir pour objet de connaissance l'interaction agent-milieu et de considérer qu'il s'agit là d'une connaissance stable permettant d'être structurée de façon naturelle et efficace ne se limite pas à être une conjecture; nos expériences l'ont démontré aussi bien en simulation qu'en applications réelles.
- Le type de structuration envisagée (aboutissant à une représentation de la topologie de l'interaction) est non seulement réalisable théoriquement, mais sa mise en pratique démontre une efficacité de traitement suffisante pour permettre son utilisation dans des applications réelles. De plus, par rapport à un agent uniquement comportemental, elle offre de nouvelles capacités (cognitives) en vue d'accroître son autonomie.
- D'autre part, les correspondances entre les représentations acquises par le robot et celles que nous pouvions prévoir en imaginant une projection de l'environnement sur son espace sensori-moteur tendent à confirmer une bonne interprétation de notre part des capacités architecturales et représentationnelles mises en jeu dans notre modèle.

L'ensemble des choix réalisés dans chacune de ces deux facettes de notre travail, architecture et représentation, contribue de façon essentielle à l'obtention de ces résultats encourageants.

- Enfin, de façon plus pratique, il existe en robotique un fossé énorme entre l'évaluation d'applications en simulation et leur évaluation sur des plates-formes réelles. Le passage de la simulation à l'application réelle est rarement envisagé ou demande des moyens techniques et humains considérables.

Dans notre cas, nous considérons que les choix méthodologiques réalisés dans notre modèle ont permis d'aboutir à une adéquation des traitements comportementaux et cognitifs par rapport aux exigences de toute application en conditions réelles: robustesse face au bruit et à l'imprévisible, réactivité et flexibilité dans l'action, capacités d'abduction et de prédiction.

Cette considération est très clairement appuyée par la facilité avec laquelle notre système a été porté du monde de la simulation à celui de l'application réelle; les connaissances acquises (représentations extraites) dans l'un ont pu être utilisées dans l'autre. Les performances sont restées très similaires et l'effort nécessaire à cette migration est réduit aussi bien en moyens techniques qu'humains.

En définitive, l'agent a démontré ses capacités à satisfaire les critères d'évaluation. Dès lors, sur la base des définitions que nous avons considérées tout au long de cette thèse, l'agent fonctionnalise son activité de façon adéquate et est donc qualifiable d'autonome à nos yeux, selon un point de vue externe.

# Conclusion

Dans le domaine des systèmes artificiels, l'étude de l'autonomie constitue un défi aussi bien scientifique que technologique. Notre travail s'est intéressé aux deux secteurs à travers la modélisation d'un agent autonome et l'application du modèle proposé au domaine de la robotique mobile.

Nous avons dans ce sens distingué deux points de vue face à l'autonomie d'un agent artificiel: le point de vue interne au système, celui du concepteur, et le point de vue externe, celui de l'observateur.

## 11.1 Bilan

Le *point de vue interne* au système est lié à notre souci de compréhension du phénomène d'autonomie; nous avons ainsi étudié la structure interne et les mécanismes de contrôle permettant de favoriser l'autonomie du système.

Face aux capacités de raisonnement des systèmes de l'IA cognitive et face aux capacités d'action démontrées par les systèmes du courant comportementaliste, nous avons proposé la notion de *fonctionnalisation* dans le but d'accéder à une intégration adéquate de l'activité et du raisonnement. Dès lors, notre contribution apparaît dans les domaines de l'architecture et de la connaissance liées à un agent autonome.

Quant à l'architecture de contrôle de l'agent autonome, nous avons

- proposé l'*architecture ARCO* comme structure globale de contrôle permettant de distinguer et d'étudier trois niveaux d'abstraction (physique, comportemental et cognitif), leurs interfaces et les différentes dynamiques qu'elle entretient,
- adopté une *approche synthétique dans la conception* qui permet de tenir compte des contraintes introduites par chacun des niveaux d'abstraction de l'architecture ARCO.

Quant à la représentation liée à la connaissance d'un agent autonome, nous avons

- proposé un *formalisme de description des capacités comportementales* qui permet de faire le lien entre le niveau comportemental et le niveau cognitif de notre modèle,
- adopté et développé une *position constructiviste* face à la connaissance de l'agent; ce choix nous a poussé à considérer une connaissance
  - portant sur l'interaction que l'agent entretient avec son milieu,
  - de type symbolique tout en conservant une sémantique opératoire pour l'agent, de par sa nature sensori-motrice.

Quant aux mécanismes liés à la connaissance de l'agent autonome, nous avons fait preuve de parcimonie

- en proposant *trois processus cognitifs* qui permettent

## Modélisation d'un agent autonome

- de structurer la connaissance linéaire formée par l'historique sensori-moteur de l'agent en une connaissance reflétant la topologie de l'interaction (processus d'interprétation et d'apprentissage),
  - de traiter cette connaissance afin d'y situer les besoins courants de l'agent et d'orienter efficacement celui-ci en vue de pouvoir satisfaire ces besoins (processus de motivation),
- en intégrant ces trois processus afin de permettre, à travers leur collaboration, d'accomplir une *fonctionnalisation adéquate de l'activité* de l'agent.

Le second point de vue adopté face à l'autonomie, le *point de vue externe* au système, est lié à notre souci de réalisation et de validation de systèmes autonomes; nous avons ainsi

- a) proposé une caractérisation de l'autonomie à travers trois critères d'évaluation:
  - la *survie* ou capacité de maintenir son intégrité physique et énergétique,
  - le *rôle social* ou capacité de satisfaire les tâches données par le concepteur,
  - l'*évolution* ou capacité d'améliorer ses performances et de s'adapter aux variations de l'environnement,
- b) développé un système informatique sur la base de notre modèle que nous avons appliqué au domaine de la robotique mobile,
- c) évalué le degré d'autonomie de notre agent sur la base des critères introduits.

De cette phase applicative de notre travail, il ressort que le modèle développé permet à un agent de satisfaire les critères d'évaluation que nous avons choisis pour caractériser l'autonomie. Ainsi, si notre agent ne peut pas être qualifié d'autonome au sens de l'autonomie d'un organisme vivant, il démontre néanmoins des propriétés dont l'intégration a rarement (à notre connaissance jamais) été effectuée par un agent artificiel complet.

En outre, notre travail se distingue également par le fait de couvrir à la fois trois axes importants. Ces axes nous ont fait parcourir différentes problématiques allant

de la perception à l'action; nous avons considéré l'ensemble de la boucle permettant de réaliser l'interaction milieu-agent ce qui a fait apparaître deux boucles internes et trois boucles externes d'interaction dans le cadre de l'architecture ARCO,

de la sensation à la représentation structurée; nous avons considéré différentes étapes de structuration de la connaissance. Au niveau comportemental, cette structuration apparaît dans l'extraction à partir des signaux capteurs des caractéristiques pertinentes constituant les stimuli des instincts. Au niveau cognitif, la structuration apparaît dans l'extraction de la topologie de l'interaction (connaissance structurée) à partir de l'historique sensori-moteur (connaissance linéaire),

de la modélisation à l'application; le modèle proposé a été implanté dans le cadre du projet MARS, ce qui a permis de valider le modèle dans le cadre de la robotique mobile; nous avons en particulier vérifié que notre robot est capable de satisfaire les critères d'évaluation que nous avons établis pour caractériser l'autonomie.

## 11.2 Comparaisons avec l'état de l'art

A la lumière de ces résultats, il nous semble adéquat d'avancer certaines comparaisons élémentaires de notre travail avec les techniques proposées par les différents courants qui sont apparus dans l'état de l'art: cognitivisme, comportementalisme et approche hybride.

Par rapport à l'approche cognitiviste:

## 11. Conclusion

- Notre système met également en évidence des capacités de raisonnement propres à satisfaire nos critères d'évaluation; ces capacités délibératives sont portées par les processus cognitifs et permettent la présence de deux facultés essentielles à l'autonomie qui sont la localisation (abduction) et la prédiction (induction).
- Il montre en plus, et c'est là la différence essentielle, des capacités d'action que les systèmes cognitivistes peuvent difficilement gérer vu la lourdeur des traitements réalisés. Cette activité est réactive et contrôlable facilement grâce à l'architecture ARCO qui permet une intégration simple et surtout efficace de l'activité et du raisonnement.

Par rapport aux approches comportementalistes:

- Une activité totalement située, basée sur un choix aléatoire, un contrôle par priorités, par fusion ou par compétition, ne suffirait pas à réaliser des tâches telles que celles que nous traitons. Ces traitements, sous la forme rigide dans laquelle ils sont abordés, permettent tout au plus de satisfaire une tâche précise mais ne permettent pas au système de pouvoir couvrir une variété de tâches et de les réaliser avec la même efficacité.
- Notre système aborde en plus, et c'est là la différence essentielle, une connaissance interne sous forme de carte cognitive et des mécanismes de raisonnement permettant de gérer, structurer et exploiter cette connaissance.

Enfin, par rapport aux travaux provenant de l'approche hybride:

- Les modèles existants aboutissent rarement à des applications réelles permettant des comparaisons concrètes et précises. Le nôtre a été développé et validé en conditions réelles.
- D'autre part, les modèles qui parviennent à supporter les contraintes d'une application réelle sont encore fortement marqués par les deux courants sources: le cognitivisme où le comportementalisme. Cet héritage empêche l'approche hybride de s'affranchir totalement des limitations des courants dont elle provient.
- Nous pensons que notre système, par le fait d'aborder le problème de l'autonomie selon trois axes (de la perception à l'action, de la sensation à la représentation et de la modélisation à l'application) permet d'aborder la même problématique sous un angle nouveau; en particulier, par une intégration simple et efficace de l'activité et du raisonnement à travers l'architecture ARCO et par une approche constructiviste de la connaissance de l'agent autonome.

### 11.3 Perspectives

Notre contribution a également permis de relever l'importance de certains aspects que nous n'avons pas abordés ou fortement simplifiés dans ce travail. Ils constituent autant de perspectives intéressantes pour des travaux futurs. Il s'agit de

- L'étude de la *co-évolution des différents niveaux d'abstraction de l'architecture*. Notre travail construit et fige les deux niveaux inférieurs (physique et comportemental) et ne traite l'évolution qu'au niveau cognitif (connaissance évolutive). Nous envisageons une étude de l'évolution de chacun des niveaux d'abstraction et de leur co-évolution; en particulier, il s'agit de déterminer les nouvelles contraintes introduites par une telle évolution dans l'approche synthétique de l'architecture.
- L'étude de l'*évolution des catégories sensorielles*. Ce point est lié au point précédent; il s'agit soit de considérer des catégories sensorielles innées mais adaptables par l'agent lui-même, soit de considérer un système référentiel totalement acquis par le système.

Cette acquisition se ferait au niveau comportemental. Cette perspective tend à compléter l'approche non-objectiviste dans le sens où elle éviterait l'intervention du concepteur dans la donnée des catégories sensorielles.

- L'étude de *l'influence de l'intensité sensorielle* au niveau comportemental et au niveau cognitif. Nous avons considéré des catégories sensorielles dépourvues de toute intensité; les stimuli sont présents ou absents. Cette approche empêche de considérer une continuité sensorielle qui permettrait d'établir une mesure de proximité entre états sensoriels. Ceci est particulièrement souhaitable pour les traitements réalisés par le processus d'interprétation pour juger de la stabilité de l'état sensoriel (lors de disparitions sporadiques de stimuli essentiellement liées au bruit par exemple) et pour permettre une comparaison moins rigoureuse (autre que l'équivalence) entre l'état sensoriel observé et l'état sensoriel prévu.
- L'étude de *différents types de structuration des connaissances* sur la base des représentations extraites dans notre travail. En particulier, nous avons vu au paragraphe 8.8.3 comment certains mécanismes de structuration, assimilables à la capacité de décentration introduite par Piaget, permettraient d'aboutir à la reconnaissance d'états solidaires apparaissant dans des contextes différents. Ainsi, par de nouvelles phases de structuration, il est envisageable d'atteindre des connaissances plus abstraites en nous rapprochant de la notion générale d'objet.

Ce sont là autant de sujets complémentaires que nous envisageons et espérons pouvoir développer.

# Bibliographie

- [AFCET, 1993] AFCET, editor (1993). *Actes du 1er congrès biennal de l'association française des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, volume 1. AFCET.
- [Agre and Chapinan, 1987] Agre, P. E. and Chapman, D. (1987). Pengi: An implementation of a theory of activity. In [Engelmore, 1987], pages 268-272.
- [Agre and Chapman, 1990] Agre, P. E. and Chapman, D. (1990). *What Are Plans for?*, pages 17-34. In [Maes, 1990a].
- [Ahuactizin et al., 1992] Ahuactizin, J. M., Talbi, E. G., Bessière, P., and Mazer, E. (1992). Using genetic algorithms for robot motion planning. In *ECAL-92*. Wien.
- [Amit, 1989] Amit, D. J. (1989). *Modeling Brain Function, The world of attractor neural networks*. Cambridge University Press.
- [Anderson and Donath, 1990] Anderson, T. L. and Donath, M. (1990). *Animal Behavior as a Paradigm for Developing Robot Autonomy*, pages 145-168. In [Maes, 1990a].
- [Angle and Brooks, 1990] Angle, C. M. and Brooks, R. A. (1990). Small planetary rovers. In *IEEE RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pages 383-388. Ikarara.
- [Antoine et al., 1992] Antoine, J.-Y., Batjard, O., Boissier, O., Caillot, B., Chaillot, M., Demazeau, Y., Pesty, S., Sichman, J., Stefanini, M.-H., and Ziebelin, D. (1992). Vers une taxinomie du vocabulaire pour les systèmes multi-agents. *Journée du PRC-IA sur les "Systèmes Multi-Agents"*.
- [ARC and InCognito, 1994] ARC and InCognito, editors (1994). *Journées Jeunes Chercheurs en Sciences Cognitives*. ARC, In Cognito.
- [Arkin, 1990] Arkin, R. C. (1990). *Integrating Behavioral, Perceptual, and World Knowledge in Reactive Navigation*, pages 105-122. In [Maes, 1990a].
- [Arkin, 1992] Arkin, R. C. (1992). Homeostatic control for a mobile robot: Dynamic replanning in hazardous environments. *Journal of Robotic Systems*, 9(2).
- [Aubin, 1991] Aubin, J. P. (1991). *Viability Theory*. Birkhauser.
- [Baerends, 1976] Baerends, G. (1976). The functional organization of behaviour. *Animal Behaviour*, 24:726-735.
- [Barthes, 1963] Barthes, R. (1963). L'activité structuraliste. *Essais critiques*, pages 215-218.
- [Beer, 1990] Beer, R. D., editor (1990). *Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in Computational Neuroethology*. Academic Press.
- [Beer and Chiel, 1991] Beer, R. D. and Chiel, H. J. (1991). The neural basis of behavioral choice in an artificial insect. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 247-254.
- [Beer et al., 1990] Beer, R. D., Chiel, H. J., and Sterling, L. S. (1990). *A Biological Perspective on Autonomous Agent Design*, pages 169-186. In [Maes, 1990a].
- [Berge, 1970] Berge, C. (1970). *Graphes et hypergraphes*. Dunod, Paris.
- [Bersini, 1991a] Bersini, H. (1991a). *Animat's 1*. Technical report 91-10, IRIDIA, Bruxelles.
- [Bersini, 1991b] Bersini, H. (1991b). A cognitive model of goal-oriented automatism and breakdowns. Technical Report 91-2, IR, IRIDIA, Bruxelles.
- [Bersini, 1992] Bersini, H. (1992). Immune network and adaptive control. In Varela, F. and Bourgine, P., editors, *Towards a practice of autonomous system*, pages 217-226. MIT Press, Bradford Books.
- [Bersini, 1994a] Bersini, H. (1994a). Reinforcement learning for homeostatic endogenous variables. In *SAB'94?*
- [Bersini, 1994b] Bersini, H. (1994b). Towards a connectionist model of actions sequences, active vision and breakdowns. In [Fuhs and Bonabeau, 1994].

- [Bersini and Gonzalez, 1993] Bersini, H. and Gonzalez, L. (1993). A simple connectionist model of actions sequence and active vision. In *Proceedings of World Congress on Neural Networks*.
- [Booker, 1991] Booker, L. B. (1991). Instinct as an inductive bias for learning behavioral sequences. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 230-237.
- [Booth and Stewart, 1993] Booth, M. and Stewart, J. (1993). Un modèle de l'émergence de la communication. In *Premières Journées IAD, SMA*.
- [Borne, 1993] Borne, P., editor (1993). *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. IEEE.
- [Bourgine, 1992] Bourgine, P. (1992). *Heuristique et Abduction, Intelligence Artificielle et Vie Artificielle*. XXII Session de l'Ecole Internationale d'Informatique de l'AFCEP.
- [Bourgine and Douzal, 1991] Bourgine, P. and Douzal, V. (1991). Les algorithmes génétiques et leurs applications. In *NEURO-NIMES*.
- [Bourgine and Varela, 1991] Bourgine, P. and Varela, F. J. (1991). Towards a practice of autonomous systems. In [Varela and Bourgine, 1991], pages xi-xvii.
- [Bourgine and Vullierme, 1993] Bourgine, P. and Vullierme, J.-L. (1993). Les machines pensantes ont-elles un ego? In *AFCEP*.
- [Braitenberg, 1989] Braitenberg, V. (1989). *Vehicles: experiments in synthetic psychology*. MIT Press/Bradford Books.
- [Brassac, 1994] Brassac, C. (1994). *Modéliser l'enchaînement conversationnel*. In [Fuhs and Bonabeau, 1994].
- [Brooks, 1986a] Brooks, R. A. (1986a). Achieving artificial intelligence through building robots. A.I. Memo 899, AI Laboratory, MIT.
- [Brooks, 1986b] Brooks, R. A. (1986b). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, HA-2.
- [Brooks, 1987a] Brooks, R. A. (1987a). A hardware retargetable distributed layered architecture for mobile robot control. *IEEE*, pages 106-110.
- [Brooks, 1987b] Brooks, R. A. (1987b). Intelligence without representation. report, MIT.
- [Brooks, 1987c] Brooks, R. A. (1987c). Planning is just a way of avoiding figuring out what to do next. Working Paper 303, MIT.
- [Brooks, 1988] Brooks, R. A. (1988). A robot that walks: Emergent behavior from a carefully evolved network. Technical report, MIT Artificial Intelligence Laboratory, 545 Technology Square, Cambridge, MA 02139.
- [Brooks, 1990] Brooks, R. A. (1990). *Elephants Don't Play Chess*, pages 3-15. In [Maes, 1990a].
- [Brooks, 1991a] Brooks, R. A. (1991a). Artificial life and real robots. In [Varela and Bourgine, 1991], pages 3-10.
- [Brooks, 1991b] Brooks, R. A. (1991b). Challenges for complete creature architectures. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 434-443.
- [Brooks, 1991c] Brooks, R. A. (1991c). Intelligence without reason. In *IJCAI'91*.
- [Brooks et al., 1986] Brooks, R. A., Connell, J., and Flinn, A. (1986). A mobile robot with onboard parallel processor and large workspace arm. In *Engineering Track, AAAI, Philadelphia*, pages 1096-1100.
- [Brooks and Connell, 1986] Brooks, R. A. and Connell, J. H. (1986). Asynchronous distributed control system for a mobile robot. *SPIE*, 727:77-84.
- [Brooks et al., 1988] Brooks, R. A., Connell, J. H., and Ning, P. (1988). Herbert: A second generation mobile robot. A.I. Memo 1016, MIT, AI Laboratory.
- [Bundy, 1983] Bundy, A., editor (1983). *Proceedings of The Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'83)*, volume 1, 2. William Kaufmann, Inc.
- [Cabanac, 1991] Cabanac, M. (1991). Pleasure: The answer to conflicting motivations. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 206-212.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Carbonell, 1989] Carbonell, J. (1989). Special volume on machine learning. In *Artificial Intelligence*, volume 40.
- [Carpenter and Grossberg, 1987] Carpenter, G. and Grossberg, S. (1987). A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine. *Computer vision, Graphics and Image Processing*, 37:54-115.
- [Carthy, 1971] Carthy, J. D. (1971). Le comportement des invertébrés. In Foss, B. M., editor, *Les voies nouvelles de la psychologie, 1. La perception et le comportement*, pages 238-256. Marabout service.
- [Ceconi and Parisi, 1993] Ceconi, F. and Parisi, D. (1993). Neural networks with motivational units. In [J.-A. Meyer and Wilson, 1993], pages 346-355.
- [Chaib-draa and Paquet, 1993] Chaib-draa, B. and Paquet, E. (1993). Routines, situations familières et non-familières dans les environnements multiagents. Rapport Interne, Département Informatique, Université Laval, Québec, Canada.
- [Chapman, 1987] Chapman, D. (1987). Planning for conjunctive goals. *Artificial Intelligence*, 32:333-377.
- [Chapman and Agre, 1986] Chapman, D. and Agre, P. (1986). Abstract reasoning as emergent from concrete activity. In Geroeff and Lansky, editors, *Proceedings of the 1986 Workshop on Reasoning about Actions and Plans*.
- [Chatila et al., 1991] Chatila, R., Alami, R., Degallaix, B., Pérébasquine, V., Gaborit, P., and Moutarlier, P. (1991). An architecture for task refinement and execution control for intervention robots: Preliminary experiments. In *Second International Symposium on Experimental Robotics*.
- [CNRS, 1992] CNRS (1992). *Le courrier du CNRS, Dossiers Scientifiques, Sciences Cognitives*.
- [Collins and Jefferson, 1991] Collins, R. J. and Jefferson, D. R. (1991). Representations for artificial intelligence. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 382-390.
- [Colombetti and Dorigo, 1993] Colombetti, M. and Dorigo, M. (1993). Training agents to perform sequential behavior. Technical Report 93-023, International Computer Science Institute, Berkeley, CA 94704, Berkeley.
- [Courant and Ludwig, 1994] Courant, M. and Ludwig, M. (1994). Un modèle d'interaction basé sur les forces. In [Fuhs and Bonabeau, 1994].
- [Covrigaru and Lindsay, 1991] Covrigaru, A. A. and Lindsay, R. K. (1991). Deterministic autonomous systems. *AI Magazine*, Fall 1991:110-117.
- [Crowley, 1987a] Crowley, J. L. (1987a). Coordination of action and perception in a surveillance robot. In [McDermott, 1987].
- [Crowley, 1987b] Crowley, J. L. (1987b). The state of the art in mobile robotics. *The Fourth Symposium on Robotics in Construction*.
- [Crowley, 1990] Crowley, J. L. (1990). Knowledge, symbolic reasoning and representation. In [Kanade et al., 1989], pages 501-515.
- [Dean and Bonasso, 1993] Dean, T. and Bonasso, R. P. (1993). 1992 aaai robot exhibition and competition. *AI Magazine*, pages 35-48.
- [Dedieu and Mazer, 1991] Dedieu, E. and Mazer, E. (1991). An approach to sensorimotor relevance. In [Varela and Bourguine, 1991], pages 88-95.
- [Dedieu et al., 1994] Dedieu, E., Mazer, E., and Bessiere, P. (1994). La modélisation sensorielle. In [Fuhs and Bonabeau, 1994].
- [Defnuant, 1992] Defnuant, G. (1992). *Réseaux connexionnistes auto-construits*. PhD thesis, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Cognitives, Université Paris 6.
- [Defnuant, 1993] Defnuant, G. (1993). Réseaux morphodynamiques et modèles cognitifs. In [AFCET, 1993], pages 185-198.
- [Defnuant and Monneret, 1993] Defnuant, G. and Monneret, E. (1993). Morphodynamic networks: The example of adaptive fibres. In [AFCET, 1993], pages 296-309.
- [Demazeau and Müller, 1990] Demazeau, Y. and Müller, J.-P., editors (1990). *Decentralized A.I., Proceedings of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in Multi-Agent World*. Cambridge, England, North-Holland.

- [Demazeau and Müller, 1991] Demazeau, Y. and Müller, J.-P., editors (1991). *Decentralized A.I., Proceedings of the Second European Workshop on Modelling Autonomous Agents in Multi-Agent World*. Saint-Quentin en Yvelines, France, North-Holland.
- [Demazeau and Werner, 1992] Demazeau, Y. and Werner, E., editors (1992). *Decentralized A.I., Proceedings of the Third European Workshop on Modelling Autonomous Agents in Multi-Agent World*. DFKI, D., North-Holland.
- [Dijkstra, 1959] Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematic*, 1:269-271.
- [Dodge, 1987] Dodge, Y. (1987). *Introduction à la programmation linéaire*. EDES, CH-2000 Neuchâtel.
- [Donnet and Smithers, 1991] Donnet, J. and Smithers, T. (1991). Lego vehicles: A technology for studying intelligent systems. In [Varela and Bourguine, 1991].
- [Dorigo and Bersini, 1994] Dorigo, M. and Bersini, H. (1994). A comparative analysis of q-learning and classifier systems. In *submitted to SAB'94*.
- [Dormoy and Kornman, 1991] Dormoy, J.-L. and Kornman, S. (1991). Meta-knowledge, and (artificial) evolution : Some lessons learnt so far. In [Varela and Bourguine, 1991], pages 392-398.
- [Drescher, 1991] Drescher, G. L. (1991). *Made-Up Minds, A Constructivist Approach to Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. London, England.
- [Dreyfus, 1972] Dreyfus, H. (1972). *What Computers can't do; A Critique of Artificial Reason*. Harper and Row.
- [Drogoul and Dnbreil, 1991] Drogoul, A. and Dubreil, C. (1991). Eco-problem-solving model: Results on the n-puzzle. In [Demazeau and Werner, 1992].
- [Ducret, 1989] Ducret, J.-J. (1989). Remarques sur les approches symboliques et infrasyboliques en sciences cognitives. *Annales du Groupe CARNAC*, 2.
- [Durfee and Lesser, 1988] Durfee, E. H. and Lesser, V. R. (1988). Predictability versus responsiveness: Coordinating problem solvers in dynamic domains. In [Engelmore, 1988], pages 66-71.
- [Elfes and Talukdar, 1983] Elfes, A. and Talukdar, S. N. (1983). A distributed control system for the cann rover. In [Bundy, 1983], pages 830-833.
- [Engelmore, 1987] Engelmore, R., editor (1987). *Proceedings of The Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'87)*, volume 1, 2. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- [Engelmore, 1988] Engelmore, R., editor (1988). *Proceedings of The Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'88)*, volume 1, 2. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- [Engelmore, 1991] Engelmore, R., editor (1991). *Proceedings of The Eighth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'90)*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- [Ferber, 1990]  
Ferber, J. (1990). The framework of eco-problem solving. In [Demazeau and Müller, 1991], pages 101-114.
- [Fergusson, 1991] Fergusson, I. A. (1991). Toward an architecture for adaptive, rational, mobile agents. In [Demazeau and Werner, 1992].
- [Firby, 1987] Firby, R. J. (1987). An investigation into reactive planning in complex domains. In [Engelmore, 1987], pages 202-206.
- [Fodor, 1986] Fodor, J. (1986). *La Modularité de l'Esprit*. Editions de Minuit.
- [Franceschini, 1992] Franceschini, N. (1992). Sequence discriminating neural network in the eye of the fly. In Beckman, F. H., editor, *Analysis and Modeling of Neural Systems*. Kluwer Academic Publishers.
- [Fuhs and Bonabeau, 1994] Fuhs, T. and Bonabeau, E., editors (1994). *Actes des Journées de Rochebrune; Autonomie et Interactions Fonctionnelles*. Telecom. ARC, CEMEAGREF.
- [Gardner, 1987] Gardner, H. (1987). *La nueva ciencia de la mente, historia de la revolución cognitiva*. Editorial Paidós. Translated by L. Wolfson.
- [Gat, 1994] Gat, Y. (1994). *Space Mapping and Navigation for a Behaviour-Based Robot*. PhD thesis, IIIA, Université de Neuchâtel.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Gat and Müller, 1991] Gat, Y. and Müller, J.-P. (1991). Simple world modelling for reactive navigation. In *AAAI Fall Symposium*.
- [Gat et al., 1993] Gat, Y., Müller, J.-P., Rodriguez, M., Facchinetti, C., Hugli, H., Maitre, G., and Tieche, F. (1993). Architecture for an autonomous system: Application to mobile robot navigation. In *NRP-23 Symposium on AI and Robotics*.
- [Gat et al., 1994] Gat, Y., Müller, J.-P., Rodriguez, M., Facchinetti, C., Hugli, H., and Tieche, F. (1994). Architecture for an autonomous system: Application to mobile robot navigation. In *2nd NRP-23 Symposium on AI and Robotics*.
- [Gat et al., 1992] Gat, Y., Rodriguez, M., and Müller, J.-P. (1992). Enriched sensitive and perceptive localization. In *Annual Meeting of the Swiss Group for Artificial Intelligence and Cognitive Science (SGAICO'92)*.
- [Gazzaniga, 1989] Gazzaniga, M. S., editor (1989). *Handbook of Cognitive Neuroscience*. Plenum Press.
- [Georgeff and Lansky, 1987] Georgeff, M. and Lansky, A. (1987). Reactive reasoning and planning. In *Proceedings of the Sixth National Conference on IA. AAAI*.
- [Georgeff et al., 1986] Georgeff, M. P., Lansky, A. L., and Shoppers, M. J. (1986). Reasoning and planning in dynamic domains: An experiment with a mobile robot. Technical report, AI Center, SRI International, 333 Ravenswood Ave, Menlo Park, California 94025.
- [Ghedira, 1993] Ghedira, K. (1993). *MASC: Une approche multi-agents des problèmes de satisfaction de contraintes*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, TOULOUSE.
- [Gingsburg, 1962] Gingsburg, S. (1962). *An Introduction to Mathematical Machine Theory*. Addison-Wesley, Massachusetts.
- [Halperin, 1991] Halperin, J. (1991). Machine motivation. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 213-221.
- [Hartsthorne and Weiss, 1931] Hartsthorne, C. and Weiss, P., editors (1931). *Collected papers of Charles Sonders Peirce*. Harvard University Press.
- [Haton et al., 1991] Haton, J.-P., Bouzid, N., Charpillat, F., Haton, M.-C., and OTHERS (1991). *Le raisonnement en Intelligence Artificielle*. InterEditions.
- [Heidegger, 1964] Heidegger, M. (1964). *L'Être et le Temps*. Gallimard. traduit par Boehm-De Waelhens.
- [Heizelman, 1993] Heizelman, E. (1993). Roboter mit köpfchen. *NFPNR-23, Technische Rundschau, Künstliche Intelligenz und Robotik*, pages 28-33.
- [Hendler et al., 1990] Hendler, J., Tate, A., and Drummond, M. (1990). Ai planning: Systems and techniques. In [Engelmore, 1991], pages 61-77.
- [Hérault, 1989] Hérault, J. (1989). Calcul neuromimétique. In *Journées d'électronique, Réseaux de Neurones Artificiels*, pages 44-58. Presses Polytechniques Romandes.
- [Hofstadter, 1988] Hofstadter, D. (1988). *Ma Thémagie (En quête de l'essence de l'esprit et du sens)*. InterEditions.
- [Holland, 1980] Holland, J. (1980). Adaptive algorithms for discovering and using general patterns in growing knowledge-bases. *International Journal of Policy Analysis and Information Systems*, 4(3):245-268.
- [Holland et al., 1986a] Holland, J., Holyoak, K., Nisbett, R., and Thagard, P. (1986a). *Induction: Processes of Inference, Learning and Discovery*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [Holland et al., 1986b] Holland, J., Holyoak, K., Nisbett, R., and Thagard, P. (1986b). *Rule-Based Mental Models*, chapter 2, pages 29-67. In [Holland et al., 1986a].
- [Huberman and Hogg, 1987] Huberman, B. A. and Hogg, T. (1987). Phase transition in artificial intelligence systems. *Artificial Intelligence*, 33:155-171.
- [J.-A. Meyer and Wilson, 1993] J.-A. Meyer, H. R. and Wilson, S. W., editors (1993). *From Animals to Animats 2: Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, volume 1. MIT Press, a Bradford Book.

- [Jamon, 1991] Jamon, M. (1991). The contribution of quantitative models to the long distance orientation problems. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 160-168.
- [Johnson, 1977] Johnson, D. (1977). Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks. *Journal of the ACM*, 24(1):1-13.
- [Jutten and Héroult, 1988] Jutten, C. and Héroult, J. (1988). Une solution neuromimétique au problème de séparation de sources. *Traitement du Signal*, 5(6):389-403.
- [Kamp and Hasler, 1990] Kamp, Y. and Hasler, M. (1990). *Réseaux de neurones récurrents pour mémoires associatives*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [Kampis, 1991] Kampis, G. (1991). *Self-Modifying Systems in Biology and Cognitive Science; A New Framework for Dynamics, Information and Complexity*. Pergamon Press.
- [Kanade et al., 1989] Kanade, T., Groen, F., and Hertzberger, L., editors (1989). *Intelligent Autonomous Systems, Proceedings of an International Conference held in Amsterdam*, volume 1-2.
- [Kiss, 1991] Kiss, G. (1991). Autonomous agents, ai and chaos theory. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 518-524.
- [Kohonen, 1989] Kohonen, T., editor (1989). *Self-Organization and Associative Memory*. Springer-Verlag.
- [Koza, 1991] Koza, J. R. (1991). Evolution of subsumption using genetic programming. In [Varela and Bourgine, 1991].
- [Langton, 1989] Langton, C. (1989). *Artificial Life*. Addison Wesley.
- [Latombe, 1988] Latombe, J.-C. (1988). Global path planning approaches for material movements in a worksite. *NATO AWR on Advanced Information Technologies for Industrial Material Flow Systems, Grenoble*.
- [LeMoigne, 1986] LeMoigne, J.-L., editor (1986). *Intelligence des mécanismes, mécanismes de l'intelligence*. Fayard / Fondation Diderot.
- [Lévy, 1987] Lévy, P. (1987). *La machine univers; Création, cognition et culture informatique*. Editions La Découverte.
- [Lorenz, 1974] Lorenz, K. (1974). *Trois essais sur le comportement animal et humain*. Editions du Seuil.
- [Maes, 1990a] Maes, P., editor (1990a). *Designing Autonomous Agents: theory and practice from biology to engineering and back*. Elsevier Science Publishers B. V.
- [Maes, 1990b] Maes, P. (1990b). *Situated Agents can have goals*, pages 49-70. In [Maes, 1990a].
- [Maes, 1991a] Maes, P. (1991a). A bottom-up mechanism for behavior selection in an artificial creature. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 238-246.
- [Maes, 1991b] Maes, P. (1991b). Learning behaviour networks from experience. In [Varela and Bourgine, 1991], pages 48-57.
- [Maes and Brooks, 1991] Maes, P. and Brooks, R. A. (1991). Learning to coordinate behaviors. In [Engelmore, 1991], pages 796-802.
- [Malcolm and Smithers, 1990] Malcolm, C. and Smithers, T. (1990). *Symbol Grounding via a Hybrid Architecture in an Autonomous Assemble System*, pages 123-144. In [Maes, 1990a].
- [Malcolm et al., 1990] Malcolm, C., Smithers, T., and Hallam, J. (1990). An emerging paradigm in robot architecture. In [Kanade et al., 1989], pages 545-564.
- [Mataric, 1990] Mataric, M. J. (1990). Learning a distributed map representation based on navigation behaviors. In *Proceedings of the USA-Japan Symposium on Flexible Automation*, pages 499-506, Kyoto, Japan.
- [Mataric, 1991a] Mataric, M. J. (1991a). Behavioral synergy without explicit integration. In *AAAI Spring Symposium on Integrated Intelligent Architectures*. Sigart.
- [Mataric, 1991b] Mataric, M. J. (1991b). Navigating with a rat brain: A neurobiological-inspired model for robot spatial representation. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 169-175.
- [Maturana, 1970] Maturana, H. R. (1970). *Biology of Cognition*, chapter 1, pages 2-57. In [Maturana and Varela, 1980].

## BIBLIOGRAPHIE

- [Maturana and Varela, 1972] Maturana, H. R. and Varela, F. J. (1972). *De Maquinas y Seres Vivos*. Editorial Universitaria S.A.
- [Maturana and Varela, 1980] Maturana, H. R. and Varela, F. J., editors (1980). *Autopoiesis And Cognition, The Realization of the Living*. D. Reidel Publishing Company.
- [Maturana and Varela, 1987] Maturana, H. R. and Varela, F. J. (1987). *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding*. New Science Library.
- [McCulloch and Pitts, 1943] McCulloch, W. and Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull. Mathem. Biophys.*, 5:115-133.
- [McDermott, 1987] McDermott, J., editor (1987). *Proceedings of The Tenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'87)*, volume 1, 2. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- [Merleau-Ponty, 1945] Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard.
- [Merleau-Ponty, 1977] Merleau-Ponty, M. (1977). *La structure du comportement*. PUF. 8eme édition.
- [Meyer and Wilson, 1991] Meyer, J.-A. and Wilson, S. W., editors (1991). *From Animals to Animals: Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, volume 1. MIT Press, a Bradford Book.
- [Minsky, 1988] Minsky, M., editor (1988). *La société de l'esprit*. Inter Editions.
- [Mitchell, 1990] Mitchell, T. M. (1990). Becoming increasingly reactive. In [Engelmore, 1991], pages 1051-1058.
- [Mondada et al., 1993] Mondada, F., Franzi, E., and Ienne, P. (1993). Mobile robot miniaturisation: A tool for investigation in control algorithms. In *Third International Symposium on Experimental Robotics*.
- [Moya, 1991] Moya, C. (1991). Intention, intentionalité et causalité. Présentation, Universidad de Valencia, Spain.
- [Müller, 1987] Müller, J.-P. (1987). *Contribution à la l'étude d'un agent rationnel: Spécification en logique intensionnelle et implantation*. PhD thesis, Université Scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Müller and Rodriguez, 1993] Müller, J.-P. and Rodriguez, M. (1993). A distributed system architecture: Application to mobile robotics. In [Borne, 1993], pages 623-625.
- [Nehmzow et al., 1990] Nehmzow, U., Hallam, J., and Smithers, T. (1990). Really useful robots. In [Kanade et al., 1989], pages 284-293.
- [Nehmzow and Smithers, 1991a] Nehmzow, U. and Smithers, T. (1991a). Mapbuilding using self-organising networks in "really useful robots". In [Meyer and Wilson, 1991], pages 152-159.
- [Nehmzow and Smithers, 1991b] Nehmzow, U. and Smithers, T. (1991b). Using motor actions for location recognition. In [Kanade et al., 1989], pages 96-104.
- [Newell and Simon, 1963] Newell, A. and Simon, H. (1963). Gps: A program that simulates human thought. In Feigenbaum, E. and Feldman, J., editors, *Computers and Thought*. McGraw-Hill.
- [Ow et al., 1988] Ow, P. S., Smith, S. F., and Thiriez, A. (1988). Reactive plan revision. In [Engelmore, 1988], pages 77-82.
- [Payton, 1990] Payton, D. W. (1990). *Internalized Plans: A Representation for Action Ressources*, pages 89-103. In [Maes, 1990a].
- [Pearce and Kuipers, 1991] Pearce, D. and Kuipers, B. (1991). Learning hill-climbing functions as a strategy for generating behaviors in a mobile robot. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 327-336.
- [Petitot, 1992a] Petitot, J. (1992a). Modèles morphodynamiques de catégorisation phonétique. *Le Courrier du CNRS, Dossier Sciences Cognitives*, page 90.
- [Petitot, 1992b] Petitot, J. (1992b). *Physique du sens*. Editions du CNRS.
- [Pfeifer and Verschure, 1993] Pfeifer, R. and Verschure, F. (1993). Designing efficiently navigating non-goal-directed robots. In [J.-A. Meyer and Wilson, 1993], pages 31-39.
- [Pfeifer and Verschure, 1991] Pfeifer, R. and Verschure, P. (1991). Distributed adaptive control: A paradigm for designing autonomous agents. In [Varela and Bourgine, 1991], pages 21-30.

- [Pfeifer and Verschure, 1992] Pfeifer, R. and Verschure, P. (1992). Beyond rationalism : symbols, patterns and behavior. *Connection Science, special issue on the philosophy of connectionism*.
- [Pichon et al., 1989] Pichon, J.-M., Blanes, C., and Franceschini, N. (1989). Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors. *SPIE, Mobile Robots IV*, 1195.
- [Resnick, 1991] Resnick, M. (1991). Logo: Animal simulations and the restructuring of science education. In [Meyer and Wilson, 1991].
- [Rodriguez, 1990] Rodriguez, M. (1990). Système de pilotage d'un robot mobile. Travail de licence, Université de Neuchâtel, IIA, Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel.
- [Rodriguez, 1994a] Rodriguez, M. (1994a). Architecture and structured representations for an autonomous agent. In *From Perception to Action, PerAc'94*. EPFL, Lausanne.
- [Rodriguez, 1994b] Rodriguez, M. (1994b). Modélisation d'un agent autonome: architecture comportementale et représentation sensori-motrice. In [ARC and InCognito, 1994], pages 57-66.
- [Rodriguez, 1994c] Rodriguez, M. (1994c). Une architecture réactive et cognitive pour la modélisation d'agents autonomes. In [Fuhs and Bonabeau, 1994].
- [Rodriguez et al., 1994a] Rodriguez, M., Erard, P.-J., and Muller, J.-P. (1994a). Virtual environments for simulating artificial autonomy. In *The seventh International Conference on Computer Animation*. Swiss National Research Foundation.
- [Rodriguez et al., 1994b] Rodriguez, M., Erard, P.-J., and Muller, J.-P. (1994b). Virtual environments for simulating artificial autonomy. In Thalman, N., editor, *Autonomous systems and virtual Reality*. J. Wiley.
- [Roitblat, 1991] Roitblat, H. (1991). Cognitive action theory as a control architecture. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 444-450.
- [Rosenblatt and Payton, 1989] Rosenblatt, K. and Payton, D. (1989). A fine-grained alternative to the subsumption architecture for mobile robot control. In *Proc. of The IEEE/INNS International Joint Conference on Neural Networks*. IEEE.
- [Russell, 1989] Russell, S. J. (1989). Execution architectures and compilation. In [Sridharan, 1989], pages 15-20.
- [Sacerdoti, 1977] Sacerdoti, E. (1977). *A Structure for Plans and Behaviour*. Elsevier-North Holland.
- [Scaglione, 1990] Scaglione, M. (1990). *Théories de la Vision, Dynamique de la relation perception-action en intelligence artificielle*. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (Paris).
- [Schmidhuber, 1991] Schmidhuber, J. (1991). A possibility for implementing curiosity and boredom in model-building neural controllers. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 222-227.
- [Schnepf, 1991] Schnepf, U. (1991). Robot ethology : A proposal for the research into intelligent autonomous systems. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 465-474.
- [Schoppers, 1987] Schoppers, M. (1987). Universal plans for reactive robots in unpredictable domains. In [McDermott, 1987].
- [Schwartz, 1992] Schwartz, E. (1992). *Introduction à la pensée et à l'action systémiques*. première partie.
- [Schwarz, 1992] Schwarz, E. (1992). Un modèle de l'émergence et de l'évolution des systèmes naturels. In *Deuxième Ecole de Systémique*. AFCET.
- [Schwarz, 1993] Schwarz, E. (1993). Systems science: A possible bridge between conceptual knowledge and spiritual experience. the case of conciousness. In *4th International Symposium on Systems Research Informatics and Cybernetics*.
- [Searle, 1983] Searle, J. R. (1983). *L'intentionnalité, essai de philosophie des états mentaux*. Les Editions de Minuit.
- [Shoham, 1988] Shoham, Y. (1988). *Reasoning about Change; Time and Causation from the Standpoint of Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [Silva et al., 1991] Silva, E., Pereira, F., and de Sousa, J. B. (1991). A blackboard approach to the mission management for autonomous underwater vehicle. In *Artificial Intelligence in Engineering*, pages 463-476.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Smithers, 1991] Smithers, T. (1991). Taking eliminative materialism seriously: A methodology for autonomous systems research. In [Varela and Bourguine, 1991], pages 31-40.
- [Sorouchyari, 1989] Sorouchyari, E. (1989). Mobile robot navigation, a neural network approach. In *Annales du groupe CARNAC*, no. 2, pages 13-24.
- [Sridharan, 1989] Sridharan, N., editor (1989). *Proceedings of The Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'89)*, volume 1, 2. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- [Steels, 1988] Steels, L. (1988). Steps towards common sense. *ECAI'88*, pages 49-54.
- [Steels, 1990] Steels, L. (1990). *Exploiting analogical representations*, pages 71-88. In [Maes, 1990a].
- [Steels, 1991] Steels, L. (1991). Towards a theory of emergent functionality. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 451-461.
- [Stefik, 1981] Stefik, M. (1981). Planning with constraints. *Artificial Intelligence*, 16:111-140.
- [Stewart, 1994] Stewart, J. (1994). L'entrainement biologique de la cognition : des conséquences pour la conceptualisation des représentations et de la faculté de langage. In [Fuhs and Bonabeau, 1994].
- [Suchman, 1987] Suchman, L. A. (1987). *Plans and situated actions*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [Sutton, 1991] Sutton, R. (1991). Reinforcement learning architectures for animats. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 288-296.
- [Tate, 1975] Tate, A. (1975). Interacting goals and their use. In *IJCAI'75*, pages 215-218.
- [Tate, 1977] Tate, A. (1977). Generating project networks. In *IJCAI'77*. Menlo Park.
- [Thomas et al., 1993] Thomas, M., Ocello, M., Gravez, P., and Bars, H. L. (1993). A distributed blackboard application to the decision making in computer aided teleoperation. In [Borne, 1993], pages 635-639.
- [Tinbergen, 1950] Tinbergen, N. (1950). The hierarchical organization of mechanisms underlying instinctive behaviour. *Experimental Biology*, 4:305-312.
- [Toates and Jensen, 1991] Toates, F. and Jensen, P. (1991). Ethological and psychological models of motivation - towards a synthesis. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 194-205.
- [Tolman, 1932] Tolman, E. (1932). *Purposive Behavior in Animals and Men*. Appleton-Century Crofts.
- [Torrás, 1993] Torrás, C. (1993). From geometric motion planning to neural motor control in robotics. *AICOM*, Vol. 6, Nr. 1, pages 3-17.
- [Touzet, 1994] Touzet, C. (1994). Apprentissage par renforcement neuronal d'un comportement d'évitement d'obstacles pour le mini-robot khepera. In [Fuhs and Bonabeau, 1994].
- [Tyrrell, 1993] Tyrrell, T. (1993). *Computational Mechanisms for Action Selection*. PhD thesis, University of Edinburgh.
- [Varela, 1979] Varela, F. (1979). *Principles of Biological Autonomy*. North Holland.
- [Varela, 1988] Varela, F. (1988). *Connaitre les sciences cognitives, tendances et perspectives*. Editions du Seuil.
- [Varela and Bourguine, 1991] Varela, F. J. and Bourguine, P., editors (1991). *Toward a Practice of Autonomous Systems, Proceedings of The First European Conference on Artificial Life (ECAL'91)*, volume 1. The MIT Press.
- [Vere, 1983] Vere, S. (1983). Planning in time: Windows and durations for activities and goals. *IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 246-267.
- [Verschure et al., 1992] Verschure, P. F., Kröse, B. J., and Pfeifer, R. (1992). Distributed adaptive control: The self-organisation of structured behavior. *Robotics and Autonomous Systems*, 9:1-16.
- [Vittoz, 1989] Vittoz, E. (1989). Analog vlsi implementation of neural networks. In *Journées d'électronique, Réseaux de neurones artificiels*, pages 223-250. EPFL, Presses Polytechniques Romandes.
- [Warren, 1974] Warren, D. (1974). Warplan: A system for generating plans. Memorandum 76, Dept. of Computational Logic, Edinburgh University.

## Modélisation d'un agent autonome

- [Watzlawick, 1978] Watzlawick, P. (1978). *La réalité de la réalité: Confusion, désinformation, communication*. Editions du Seuil.
- [Webb and Smithers, 1991] Webb, B. and Smithers, T. (1991). The connection between ai and biology in the study of behaviour. In [Varela and Bourgine, 1991], pages 421-428.
- [Wehrle, 1994] Wehrle, T. (1994). *Eine Methode zur psychologischen Modellierung und Simulation von Automaten Agenten*. PhD thesis, Philosophische Fakultät I, Universität Zürich.
- [Weisbuch, 1989] Weisbuch, G. (1989). *Dynamique des systèmes complexes, Une introduction aux réseaux d'automates*. InterEditions et Editions du CNRS.
- [Wilkins, 1983] Wilkins, D. (1983). Representation in a domain independent planner. In [Bundy, 1983], pages 733-740.
- [Winograd and Flores, 1987] Winograd, T. and Flores, F. (1987). *Understanding computers and cognition*. Ablex Publ.
- [Yeap and Handley, 1991] Yeap, W. and Handley, C. (1991). Four important issues in cognitive mapping. In [Meyer and Wilson, 1991], pages 176-183.
- [Yeap, 1988] Yeap, W. K. (1988). Towards a computational theory of cognitive maps. *Artificial Intelligence*, 34:297-360.