

RECHERCHE DES SIGNATURES PALÉOCLIMATIQUES DANS LES
REMPLISSAGES LACUSTRES FINI- ET POSTWÜRMIENS DU LOCLE
(NEUCHÂTEL, SUISSE) ET D'ILAY (JURA, FRANCE) À PARTIR DES
ANALYSES PALYNOLOGIQUES, MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES

THÈSE

Présentée à la Faculté des Sciences

de l'Université de Neuchâtel

pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences

par

Patrick SCHOELLAMMER

Soutenue le 8 Avril 1997

Devant le jury d'Examen

Prof. B. KÜBLER, Université de Neuchâtel
Dr. H. RICHARD, UMR 6565 du CNRS de Besançon
Prof. J.-C. HUNZIKER, Université de Lausanne
Prof. M. DELALOYE, Université de Genève
Prof. B. AMMANN, Universität Bern
Prof. J. REMANE, Université de Neuchâtel

Président
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

RECHERCHE DES SIGNATURES PALÉOCLIMATIQUES DANS LES
REMPLEISSAGES LACUSTRES FINI- ET POSTWÜRMIENS DU LOCLE
(NEUCHÂTEL, SUISSE) ET D'ILAY (JURA, FRANCE) À PARTIR DES
ANALYSES PALYNOLOGIQUES, MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES

THÈSE

Présentée à la Faculté des Sciences
de l'Université de Neuchâtel

pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences

par

Patrick SCHOELLAMMER

Soutenue le 8 Avril 1997

Devant le jury d'Examen :

Prof. B. KÜBLER, Université de Neuchâtel
Dr. H. RICHARD, UMR 6565 du CNRS de Besançon
Prof. J.-C. HUNZIKER, Université de Lausanne
Prof. M. DELALOYE, Université de Genève
Prof. B. AMMANN, Universität Bern
Prof. J. REMANE, Université de Neuchâtel

Président
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

**Recherche des signatures paléoclimatologiques
dans les remplissages lacustres finl- et
postwürmiens du Locle (Neuchâtel, Suisse) et
d'Illay (Jura, France) à partir des analyses
palynologiques, minéralogiques et géochimiques**

de M. Patrick Schoellammer

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL
FACULTÉ DES SCIENCES

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

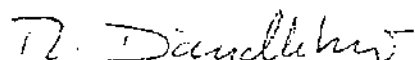
Mme B. Ammann (Berna),
MM. B. Kübler (directeur de thèse),
J. Remane, M. Delaloye (Sion),
J. Hunziker (Lausanne) et H. Richard (Besançon)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 25 juin 1997

Le doyen:

R. Dändliker



A la mémoire de mon père

Avant-Propos

Avant-Propos

Ce travail n'aurait jamais pu être mené à son terme sans l'aide combien inestimable de ceux qui ont bien voulu me conseiller et me supporter. Aujourd'hui, il m'est très agréable de les remercier ici.

Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait le Professeur Bernard Kübler en m'accueillant à l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel et en me confiant la réalisation d'une partie du projet dont il est l'instigateur. Il m'a permis de trouver les moyens et l'environnement indispensables à une grande partie de mes recherches.

Monsieur le Professeur Michel Bidault a su me transmettre sa passion pour la botanique, de plus, ses conseils ont toujours été pour moi d'un grand soutien ; qu'il en soit ici vivement remercié. Monsieur Pierre Pêtrequin, directeur du Laboratoire de Chrono-Ecologie de Besançon, m'a donné les moyens et le cadre de travail nécessaire à la réalisation de la partie bisontine de mes travaux.

Toute ma reconnaissance s'adresse à Hervé Richard pour la confiance qu'il m'a témoignée en me recommandant au Professeur Bernard Kübler et pour l'attention avec laquelle il a co-dirigé mon travail. Son investissement sur le terrain, ses remarques et ses encouragements ont toujours été pour moi très précieux.

Je remercie vivement Messieurs les Professeurs Johannes Hunziker et Michel Delaloye pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette partie du projet et l'honneur qu'ils m'ont fait de participer à mon jury de thèse.

A ceux qui ont accepté de juger ce travail avec tout le poids de leurs compétences, Madame et Monsieur les Professeurs Brigitta Ammann de l'Université de Berne, Jürgen Remane de l'Université de Neuchâtel, je tiens à exprimer ma respectueuse reconnaissance et ma profonde gratitude.

Je ne suis pas en droit d'oublier la disponibilité et la passion que m'a fait partager Gilles Bossuet pour l'étude géophysique et sédimentologique de ce bassin sédimentaire. Je tiens également à lui exprimer tous mes remerciements pour l'aide qu'il m'a apporté dans la conception des figures et les corrections du manuscrit.

Avant-Propos

Michel Magny a effectué des analyses sédimentologiques dont il a bien voulu me communiquer les résultats. Ses précieux conseils, ses connaissances de l'histoire paléoclimatique des lacs jurassiens ont toujours enrichi mes réflexions. Je lui adresse ici mes plus vifs remerciements.

Jacques Mouthon trouvera ici un modeste témoignage de ma reconnaissance pour les analyses malacologiques effectuées en dehors de son travail habituel et pour les longues conversations de l'année 1995.

Les analyses isotopiques d'Ilay ont été faites par Maria Laëtizia Filippi à l'Institut de Minéralogie et Pétrographie de l'Université de Lausanne. Les réunions de travail se sont toujours déroulées dans une ambiance chaleureuse. Je lui adresse ici toute mon amicale sympathie.

Qu'il me soit permis de dire combien j'ai apprécié le dévouement et la disponibilité d'Orlando Orlandini, qui malgré ses occupations aux Moulins du Col-des-Roches, nous a rendu d'innombrables services matériels et administratifs.

Les Services Industriels de la ville du Locle ont aimablement mis à notre disposition les nombreuses archives concernant de près ou de loin le Marais du Col-des-Roches et nous ont communiqué leurs propres données météorologiques.

Je suis également redevable envers Thierry Adatte qui m'a initié aux techniques de la diffraction et a accepté la relecture du manuscrit malgré la charge de son emploi du temps. Carlos Beck, Olga Sierra, Sabine Brocero se sont par ailleurs impliqués dans la réalisation de ce travail, avec patience, ils m'ont transmis toutes les techniques mises en oeuvre dans le domaine de la géochimie au LMPG.

Mes remerciements s'adressent également à Martine Feuvrier qui a reçu la tâche ingrate de préparer une partie des échantillons pour l'analyse pollinique et à Florence Chapuis-Broc pour les premiers travaux de dactylographie à Besançon. José Richard a mis toute son énergie dans la préparation des plaques orientées lesquelles lui ont donné une surcharge de travail importante.

Que les personnes qui ont participé aux campagnes de terrain trouvent ici le témoignage d'une reconnaissance particulière : Pascal Guenet, Hervé Richard, Michel Magny, Gilles Bossuet, Manuel Romero, Nelly Botella, Pascale Ruffaldi, Olivier Puertas, Carole Bégeot, Marc Rolli, Maria-Laëtizia Filippi, Andreas Moscariello, Essaid Zeroual, Sabine Brocero, Sophie Marguier, Jean-Claude Lambert.

Christian Rieben, du bureau de géotechnique de Bienne, n'a pas hésité à nous transmettre les données sur lesquelles il avait travaillé et qui n'étaient pas encore remises aux Services Industriels, qu'il trouve ici toute ma gratitude.

Pour son aide précieuse en matière d'informatique, et pour la réalisation de la maquette finale de ce mémoire, je ne saurais oublier Jean-Claude Rougeot, je lui témoigne ici toute mon amicale sympathie.

Le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique a assuré le financement de deux années de recherche (subside n°4031-033204). L'Université de Neuchâtel, m'a quant-à elle alloué une bourse d'échange exceptionnelle pour terminer la rédaction des divers rapports de cette recherche.

Enfin, à tous ceux qui sont restés dans "l'ombre", parents et amis, je vous adresse ici tous mes remerciements pour votre inestimable soutien.

Sommaire

Sommaire

AVANT PROPOS	5
SOMMAIRE	11
RÉSUMÉ	19
INTRODUCTION	23

PREMIÈRE PARTIE : I Cadre général de l'étude

1. LA CHAÎNE JURASSIENNE	33
1.1. CADRE GÉOGRAPHIQUE	33
1.2. CADRE GÉOLOGIQUE	35
1.3. CADRE CLIMATIQUE	36
1.4. CADRE PHYTOGÉOGRAPHIQUE	37
2. PRÉSENTATION DES SITES	39
2.1. LE MARAIS DU COL-DES-ROCHES, COMMUNE DU LOCLE (NEUCHÂTEL - SUISSE)	39
2.1.1. Situation géographique	39
2.1.2. Situation hydrogéologique	39
2.1.3. Cadre géologique quaternaire	40
2.1.4. Éléments de climatologie	45
2.1.5. Particularités de la végétation actuelle du Locle	46
2.2. LE LAC D'ILAY	46
2.2.1. Cadre géographique	46
2.2.2. Cadre géologique	47
2.2.3. Éléments de climatologie	47
2.2.4. La végétation actuelle à Ilay	48

Sommaire

PREMIÈRE PARTIE : 2 Méthodes et Techniques

1. LA RECONNAISSANCE DES CORPS SÉDIMENTAIRES	51
1.1. LES FORAGES ANCIENS	51
1.2. LES FORAGES RÉCENTS	52
1.3. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES	55
2. REPRÉSENTATIVITÉ ET STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE	57
3. CHOIX DES TYPES D'ANALYSES ET PRÉPARATION DU MATÉRIEL	57
3.1. LA PALYNOLOGIE	57
3.2. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS POUR LA MINÉRALOGIE ET LA GÉOCHIMIE	62
3.3. LA MINÉRALOGIE	63
3.4. LA GÉOCHIMIE	67

DEUXIÈME PARTIE : 1 Morphologie du bassin lacustre, nature et géométrie des corps sédimentaires

1. RECONNAISSANCE DE LA MORPHOLOGIE DU BASSIN LACUSTRE QUATERNAIRE	79
2. RÉSULTATS	80
2.1. DISTRIBUTION SPATIALE DES RÉSISTIVITÉS	81
2.2. STRUCTURE DU SOUS-SOL ASSOCIÉE AUX ANOMALIES DE RÉSISTIVITÉ	83
2.3. INTERPRÉTATION DES CARTES DE RÉSISTIVITÉ	86
2.4. INTERPRÉTATION QUANTITATIVE DES SONDAGES ÉLECTRIQUES	88
3. GÉOMÉTRIE DES CORPS SÉDIMENTAIRES	91
3.1. DESCRIPTION DES CORPS SÉDIMENTAIRES	91
3.2. LE REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE	91
3.3. RÉPARTITION DES CORPS SÉDIMENTAIRES	92
4. RÉSUMÉ	94

DEUXIÈME PARTIE : 2 Histoire de la végétation

1. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES DES FORAGES DU MARAIS DU COL-DES-ROCHES (NEUCHÂTEL, SUISSE)	98
1.1. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES DU FORAGE LLC1	98
1.2. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES DES FORAGES LLC1-2 À LLC1-5	98
1.3. LES ANALYSES PONCTUELLES DU FORAGE LLC2	98
1.4. COMPARAISONS DES ZONES POLLINIQUES LOCALES DES TROIS FORAGES	99
1.5. ZONES POLLINIQUES LOCALES ET CONCENTRATIONS ABSOLUES	100
1.6. HISTOIRE DE LA VÉGÉTATION SUR LE SITE DU LOCLE	103
1.6.1. Le Pléniglaciaire	103
1.6.2. Lacune de la majorité du Tardiglaciaire	106
1.6.3. Le Préboréal	108
1.6.4. Le Boréal	109

1.6.5. L'Atlantique	109
1.6.6. Le Subboréal	111
1.6.7. Le Subatlantique	112
1.7. RAPPORTS ENTRE LES TYPES SÉDIMENTAIRES ET LA CHRONOLOGIE	113
1.8. LES INDICES POLLINIQUES DE L'ACTIVITÉ HUMAINE	113
2. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES DU FORAGE 2 DU SITE D'ILAY (JURA, FRANCE). LE DIAGRAMME DU SITE D'ILAY (JURA, FRANCE)	116
2.1. LES ZONES POLLINIQUES	116
2.2. CONCENTRATIONS ABSOLUES ET ZONES POLLINIQUES LOCALES	116
2.3. HISTOIRE DE LA VÉGÉTATION	118
2.3.1. Les apports des travaux antérieurs	118
2.3.2. Nouvelles données	119
2.4. LES INDICES POLLINIQUES DE L'ACTIVITÉ HUMAINE	121
3. LES GRANDES LIGNES DE L'HISTOIRE DE LA VÉGÉTATION DU LOCLE ET D'ILAY	123
 DEUXIÈME PARTIE : 3 Minéralogie, histoire des sédiments	
1. LE MARAIS DU COL-DES-ROCHES (NE ; CH)	128
1.1. MINÉRALOGIE DU SÉDIMENT TOTAL	128
1.1.1. Étude des minéraux non argileux du forage LLC 1	128
1.1.2. Traitement statistique des données	130
1.1.3. Synthèse	133
1.1.4. Étude des minéraux non argileux des forages LLC1-2 à LLC1-5 :	133
1.1.5. Traitement statistique des données du forage LLC 1-2 à 5	135
1.1.6. Étude des minéraux non argileux	136
1.1.7. Traitement statistique des données	138
1.1.8. Comparaison des zones minéralogiques des trois forages : les associations minéralogiques	140
1.1.9. Synthèse	141
1.2. MINÉRALOGIE DES FRACTIONS MINÉRALES ARGILEUSES < 2 µm ET 2 - 16 µm	142
1.2.1. La fraction minérale argileuse < 2 µm du forage LLC 1	142
1.2.2. La fraction minérale argileuse 2-16 µm du forage LLC 1	143
1.2.3. Étude de la fraction argileuse et des minéraux en grains < 2 µm des forages LLC 1-3/4 et 5	145
1.2.4. La fraction minérale argileuse 2-16 µm des forages LLC1-3/4 et 5	146
1.2.5. Traitement statistique des données de la minéralogie des fractions granulométriques < à 2 µm et 2-16 µm	147
1.2.6. La représentation triangulaire des séries harmoniques	150
1.3. LES ANALYSES MINÉRALES DES FRACTIONS ARGILEUSES DES SÉDIMENTS OEHNINGIENS DU BASSIN VERSANT	152
1.3.1. La fraction < 2 µm glycolée	153
1.3.2. La fraction 2-16 µm	153
1.3.3. Les séries harmoniques des sédiments oehningiens	154
1.4. COMPARAISON DES ZONES MINÉRALOGIQUES DES FRACTIONS ARGILEUSES DES SÉDIMENTS LACUSTRES ET OEHNINGIENS	155
1.5. INTERPRÉTATION - DISCUSSION	157

Sommaire

1.5.1. Les apports de la minéralogie des sédiments du Locle	157
1.5.2. Analyse numérique des données	158
1.5.3. Les associations minéralogiques	158
1.5.4. Les faciès sédimentaires	159
1.5.5. Origine sédimentaire	162
2. LE LAC D'ILAY (JURA, FRANCE)	167
2.1. MINÉRALOGIE DU SÉDIMENT TOTAL	167
2.1.1. Les minéraux non argileux	167
2.1.2. Analyse Factorielle en Composantes Principales des pourcentages des minéraux	167
2.1.3. Zones minéralogiques et associations minéralogiques du forage d'Ilay	170
2.2. ÉTUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX	170
2.2.1. Identification des chlorites	172
2.2.2. Identification des micas	173
2.3. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION	173
2.3.1. Les apports de la minéralogie à Ilay	173
2.3.2. L'origine des minéraux à Ilay	173
3. SYNTHÈSE	174
3.1. LE LOCLE	174
3.2. ILAY	175
4. MINÉRALOGIE ET CHRONOZONATION	175
DEUXIÈME PARTIE : 4 Géochimie	
1. LES ANALYSES CHIMIQUES DES SONDAGES DU MARAIS DU COL-DES-ROCHES (NE ; CH)	184
1.1. LES ANALYSES ÉLÉMENTAIRES SUR SÉDIMENT TOTAL	184
1.1.1. Forage LLC1	184
1.1.2. Forage LLC1-2 à 5	186
1.1.3. Forage LLC2	187
1.2. LA SPÉCIATION DES CARBONATES : LES ANALYSES CHIMIQUES DE LA PHASE ACIDO-SOLUBLE	188
1.2.1. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble du forage LLC1	188
1.2.2. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble des forages LLC1-2 à 5	188
1.2.3. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble du forage LLC2	190
1.2.4. Comparaison des zones géochimiques des trois forages du Locle	190
1.2.5. Analyse Factorielle en Composantes Principales des données de la géochimie	192
1.3. CARACTÉRISATION DES FACIES SÉDIMENTOLOGIQUES	195
1.3.1. Les argiles silteuses grises	195
1.3.2. Les craies lacustres	196
1.3.3. Les gyttjas	196
1.3.4. Les tourbes	197
1.4. ORIGINE DES ÉLÉMENTS	198

1.4.1. Analyse multivariée des données de la géochimie et de la minéralogie	198
1.4.2. Discussion	199
1.5. SYNTHÈSE : LES APPORTS DE LA GÉOCHIMIE AU LOCLE	202
2. LE FORAGE DU LAC D'ILAY	202
2.1. LES ANALYSES ÉLÉMENTAIRES DU SÉDIMENT TOTAL	202
2.2. LA SPÉCIATION DES CARBONATES	204
2.3. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES DU FORAGE D'ILAY	204
2.4. LES ISOTOPES STABLES DE L'OXYGÈNE ($\delta^{18}\text{O}$) ET DU CARBONE ($\delta^{13}\text{C}$)	206
2.5. LES APPORTS DE LA GÉOCHIMIE À ILAY	208
2.6. INTERPRÉTATIONS-DISCUSSION	208
2.6.1. Physico-chimie des eaux et des sédiments actuels	208
2.6.2. Chimie des sédiments anciens	209
2.6.3. Données isotopiques	212
3. HISTOIRE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET CHRONOZONATION	213
DEUXIÈME PARTIE : 5 Reconstitution paléohydrologique au Col-des-Roches	
1. LES ANALYSES SÉDIMENTOLOGIQUES	219
2. LES ANALYSES MALACOLOGIQUES	221
3. COMPARAISONS DES DONNÉES DE LA MALACOLOGIE ET DE LA SÉDIMENTOLOGIE	223
4. COMPARAISON DES RÉSULTATS DU LOCLE AVEC LES DONNÉES RÉGIONALES	224
5. SYNTHÈSE	226
TROISIÈME PARTIE : Synthèse	
1. LES APPORTS DE LA GÉOPHYSIQUE ET DES DONNÉES ANCIENNES DE FORAGES AU LOCLE	233
2. LES APPORTS DE L'ÉTUDE POLLINIQUE DES SÉDIMENTS DU LOCLE	234
3. SIGNATURES PALYNOLOGIQUES, MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES DANS LES SÉDIMENTS DU LOCLE ET D'ILAY	234
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	245
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	261
ANNEXES	271

Résumé

Résumé

L'histoire du paléolac du Col-des-Roches (NE, CH) a été reconstituée sur la base d'un forage de 41 m et de 5 forages supplémentaires pour préciser la nature et la mise en place des différents corps sédimentaires. Le point de forage principal a été retenu après rassemblement des données d'une cinquantaine de points forés depuis 1858. Des méthodes géophysiques de surface ont été employées pour reconstituer la morphologie du fond du remplissage et établir un repérage spatial des corps sédimentaires.

L'étude du contenu sporopollinique des sédiments a mis en évidence, pour la première fois dans le Jura, une séquence pléniglaciaire de près de 28 m. La plus grande partie du Tardiglaciaire fait défaut, mais le détail de la séquence holocène permet de suivre l'évolution du couvert végétal de cette partie du massif jurassien et de mettre en évidence des marqueurs anthropiques dès la seconde moitié de l'Atlantique ancien. Le début du Subboréal montre, quant à lui, une installation conjointe du sapin et du hêtre de manière très progressive.

La minéralogie des fractions argileuses souligne la présence d'un épisode détritique dans le deuxième tiers du Boréal. La minéralogie, tout comme la palynologie, montre l'important héritage d'éléments du bassin versant tout au long du comblement de la dépression lacustre. Les mesures effectuées en géochimie corroborent les observations faites en minéralogie. Une reconstitution paléolimnimétrique de ce remplissage lacustre, allant du Dryas récent à l'Atlantique ancien, montre que les fluctuations hydrologiques qui ont affecté jadis ce plan d'eau s'intègrent parfaitement dans le schéma régional des fluctuations lacustres du Jura et des Alpes du nord dont le parallélisme avec les oscillations climatiques a été établi par ailleurs.

L'étude d'une carotte courte du lac d'Ilay (Jura, France) a donné la possibilité de reconstituer de manière détaillée, grâce à un pas d'échantillonnage fin, l'histoire de la végétation des trois derniers millénaires, ce que ne pouvaient offrir les forages du Locle. Si la reconstitution paléohydrologique basée sur l'étude des concrétions carbonatées et de la faune malacologique est bien établie, il apparaît que la minéralogie et la géochimie employées ici ne disposent pas de la sensibilité nécessaire pour déceler des événements paléoclimatiques de courte durée et d'intensité relativement peu importante.

MOTS CLÉS :

JURA, SUISSE, PLÉNIGLACIAIRE, HOLOCÈNE, PALYNOLOGIE, HISTOIRE DE LA VÉGÉTATION, MINÉRALOGIE, GÉOCHIMIE, VARIATIONS DU NIVEAU LACUSTRE, HISTOIRE DU CLIMAT

Abstract

A 41 metres depth core drilling and 5 other cores have been made in the Col-des-Roches palaeolake near Le Locle (Neuchâtel, Switzerland) in order to reconstruct the history of the lake and to determine the nature and chronology of the lacustrine infillings. The morphology of the basin and the geometry of the lacustrine infillings were determined by geophysical prospecting and several core drillings made since 1858.

For the first time in the Jura mountains, the pollen analysis shows a glacial period sequence 28 metres deep. The major part of the Late Glacial is missing but the Holocene is well represented. During the Older Atlantic the first pollen revealing human impact can be observed. The fir and the beech appear together and gradually at the beginning of the Subboreal.

Clay mineralogy shows a detritic phase during the middle of the Boreal. Mineralogy and palynology show the importance of reworked material from the catchment in the infillings. Geochemistry data gave the same detrital evolution scheme previously put into evidence by mineralogy. The reconstitution of lake level fluctuations from the Younger Dryas to the Older Atlantic are the same as those observed in all the Jura mountains and the Swiss Plateau. These fluctuations have a climatic origin.

The study of a short core from lake Ilay (Jura, France) permitted to reconstruct with a high resolution the vegetation history for the last three millenia. While the lake level fluctuations recorded in malacologic fauna and in the carbonaceous concretions are well established, it appears that malacology, geochemistry data are not sensitive enough to identify short and low intensive palaeoclimate events.

KEY-WORDS:

Jura, Switzerland, Glacial Period, Holocene, Palynology, Vegetation history, Mineralogy, Geochemistry, Lake level fluctuations, Climate history.

Introduction

Introduction

La Terre, au cours des temps géologiques, a traversé de nombreuses périodes de réchauffement et de refroidissement. Le Quaternaire, qui a débuté il y a près de 1.7 millions d'années, est caractérisé par la fréquence de cette alternance de phases glaciaires et interglaciaires. Si ces grandes phases climatiques sont, du moins pour les plus récentes, relativement bien connues aujourd'hui, de nombreuses recherches ont été entreprises ces dernières années pour décrire, à l'intérieur de ces grandes unités, des fluctuations climatiques de plus faibles amplitudes. S'agissant du Tardiglaciaire et de l'Holocène, la reconnaissance de ces fluctuations "mineures" a beaucoup évolué et ceci grâce à des approches fort différentes : paléobotanique, glaciologie, limnologie, études historiques, etc...

La première théorie sur les glaciations revient au suisse Louis Agassiz en 1843, cette théorie fit grand bruit dans la communauté scientifique de l'époque. Il fallut attendre le début du XX^{ème} siècle, après que les idées d'Agassiz aient progressivement fait leur chemin, pour que deux géographes allemands, Penck et Bruckner proposent l'existence non pas d'une seule glaciation, mais d'une succession de quatre épisodes climatiques très froids. Vint ensuite la théorie du mathématicien Milankovitch qui proposa une origine astronomique à ces variations climatiques. La méthode des datations par le carbone 14 bouscula quelques temps cette hypothèse du fait des décalages observés entre les âges avancés par Milankovitch et les datations absolues. Milankovitch estimait le dernier minimum d'insolation vers 25000 ans alors que le ¹⁴C situait le dernier maximum glaciaire vers 18000 ans. Depuis, les recherches se sont diversifiées principalement dans le milieu océanique et dans les grandes calottes glaciaires actuelles. Ces recherches ont débouché sur la vérification de la théorie de Milankovitch (Mason, 1976 ; Joussaume, 1993 ; Duplessy,

Introduction

Morel, 1992 ; Berger, 1992 etc.), sur la connaissance du rythme et de la périodicité de ces glaciations (Rampino et al., 1987 ; Pecker, Runcorn, 1990 ; Burroughs, 1992 etc...) et enfin sur l'établissement de modèles (Kendall, 1976 ; Panofsky, Brier, 1958 ; Imbrie, 1985 ; Philander, 1983 ; Berger, 1990). Ces modèles servent aujourd'hui à prévoir l'avenir climatique de la planète. Des études ont montré que nous retournions vers une période glaciaire dont un des maxima serait atteint dans 5000 ans. Toutefois, Burroughs (1992) introduit son livre en ces termes *"Yet now more than ever, we need to understand why the climate changes and whether human activities are producing effects which are comparable to the natural variability of the global climate"*.

Le réchauffement récent de la planète est-il la conséquence de l'effet de serre ou s'inscrit-il dans le cycle normal des changements de climat ? Pourquoi et à quel rythme la terre se réchauffe-t-elle ? Ces questions auxquelles tentent de répondre la communauté scientifique (Duplessy, Ruddiman, 1983 ; Broecker, Denton, 1990 ; Schneider, 1990 ; Burroughs, 1992 ; Huet, 1995 ; Magny, 1995 ; etc...) sont loin d'être résolues. Si l'existence de cycles climatiques millénaires, voire pluriséculaires, marquant l'histoire de la terre semble maintenant admise, la mise en évidence de marqueurs plus ou moins directement liés au climat n'est pas toujours aisée (Robert, Chamley, 1990 ; Kolla et al., 1979 ; Grousset et al., 1983 ; De Visser, 1989 ; Ergin, 1982 ; Moscariello, 1996 ; Filippi, 1996). Il faut maintenant adopter une échelle différente pour comprendre les oscillations climatiques d'ordre séculaire ou pluriséculaire, ce que les modèles et les archives glaciaires ne font pas apparaître. Une place privilégiée est accordée à deux événements froids qui ont marqué l'histoire récente de la Terre : le Dryas récent et le Petit Age Glaciaire (Magny, 1995). Pourtant pour comprendre l'évolution du climat, il faut établir une histoire climatique depuis la fin de la dernière glaciation sans se limiter à ces deux épisodes.

Pour tenter de répondre en partie à ces questions, un programme national de la recherche scientifique suisse (PNR 31) intitulé "Changements climatiques et catastrophes naturelles" a été mis en place. En son sein, plusieurs thèmes fédérateurs concernent plus particulièrement l'histoire du climat depuis la dernière glaciation. Le Jura, en raison de sa richesse en lacs, marais et tourbières est une zone privilégiée pour l'étude de l'évolution des climats passés à travers les témoins préservés dans les sédiments. Le programme JURACLIM, dans ce PNR 31, se propose d'étudier des séquences sédimentaires à travers la Chaîne Jurassienne et d'en tirer des informations sur l'évolution du climat des 20 derniers millénaires. Son but est de rechercher les signatures paléoclimatiques, de trouver des marqueurs communs aux différents sites et enfin de comprendre pourquoi certains événements sont mieux enregistrés que d'autres (Dryas récent et Petit Age Glaciaire).

Cette recherche a nécessité de nombreux moyens visant à élaborer des bases de travail et de comparaison avec d'autres sites. A partir des données de la palynologie, de la minéralogie et de la géochimie, la recherche des marqueurs des changements climatiques a été entreprise par confrontation avec des travaux effectués en parallèle ou déjà publiés. Ces trois domaines de recherche ont été retenus afin de limiter le nombre de descripteurs dans la perspective de faciliter le traitement des données. D'autre part, il était également nécessaire de retenir un petit nombre de sites.

Compte tenu de tous ces éléments, le Marais du Col-des-Roches (Canton de Neuchâtel, Suisse) a été choisi pour sa position altitudinale et l'absence de données anciennes. Le choix s'est également porté sur le lac d'Ilay (Jura, France) pour la nature de son sédiment, les données historiques à disposition sur la période Subatlantique et pour les corrélations paléoclimatiques déjà établies grâce à d'autres approches ; ce site test permet d'estimer la sensibilité des méthodes utilisées.

Dans un premier temps, les sites retenus pour l'étude sont présentés dans leur contexte géographique, géologique et bioclimatologique ; les particularités propres à chaque station sont ensuite précisées dans cet environnement. Puis, chacune des méthodes mises en oeuvre est présentée.

Le cadre paléoenvironnemental a été en premier lieu établi à partir des données de la palynologie. De cette façon, il a été possible de replacer les différentes étapes du comblement de ces lacs dans un cadre chronologique relatif par comparaison avec les données régionales. Les données de cette discipline offrent également la possibilité de suivre toutes les étapes de la colonisation humaine des zones étudiées et de décrire l'évolution de l'action de l'homme sur le couvert végétal. Enfin, la palynologie donne l'opportunité d'esquisser le cadre climatique dans lequel cette évolution de la végétation et les étapes du peuplement humain se sont opérées.

La nature, la composition et l'origine des différents composants minéraux et chimiques des sédiments sont à l'image des apports, des processus sédimentaires et des conditions climatiques au moment du dépôt. L'étude des sédiments lacustres du Locle et d'Ilay a été entreprise pour connaître la nature et l'origine des minéraux qui les composent. Les minéraux peuvent avoir deux origines : l'une allochtone (apports éoliens, ruissellements, re-suspensions), l'autre autochtone (bioproduction, précipitations chimiques, formation sur place dans des conditions physico-chimiques et climatiques locales bien précises). Ces sources différentes conditionnent la composition minéralogique des sédiments. Les minéraux allochtones jouent le rôle de traceurs naturels ; par les associations constituées, ils indiquent leurs provinces d'origines (Bapst, 1987). L'analyse des variations de la composition minérale au cours du temps permet de repérer des épisodes de reprise d'érosion du bassin versant (apports détritiques accrus) ; l'augmentation des minéraux allochtones dans les sédiments peut être interprétée comme une réponse sédimentaire liée à des modifications climatiques ou à une influence humaine marquée sur le bassin versant.

La pluviosité et la température sont les facteurs principaux contrôlant la solubilisation de nombreux éléments majeurs comme Si, Al, Na, K, Ca, Mg... provenant de la couverture pédologique et des affleurements du substrat (Gibbs, 1970 ; Gac, 1979 ; Sondag et al., 1993). Ainsi, la variation des apports chimiques des éléments des bassins versants du Locle et d'Ilay a dû accompagner les changements climatiques quaternaires et les modifications de végétation qui en découlent. Pour cette raison, nous présumons que des signaux chimiques liés à ces variations peuvent être perçus dans ces sédiments. Le but de ce travail est d'essayer d'identifier des tels signaux sur les sites du Locle et d'Ilay.

Introduction

Enfin, les informations issues de la palynologie, de la minéralogie et celles de la géochimie sont confrontées avec celles d'autres disciplines : malacologie et sédimentologie, isotopes stables de l'oxygène et du carbone (pour le site d'Ilay), dans une tentative de synthèse paléoclimatique.

Première Partie

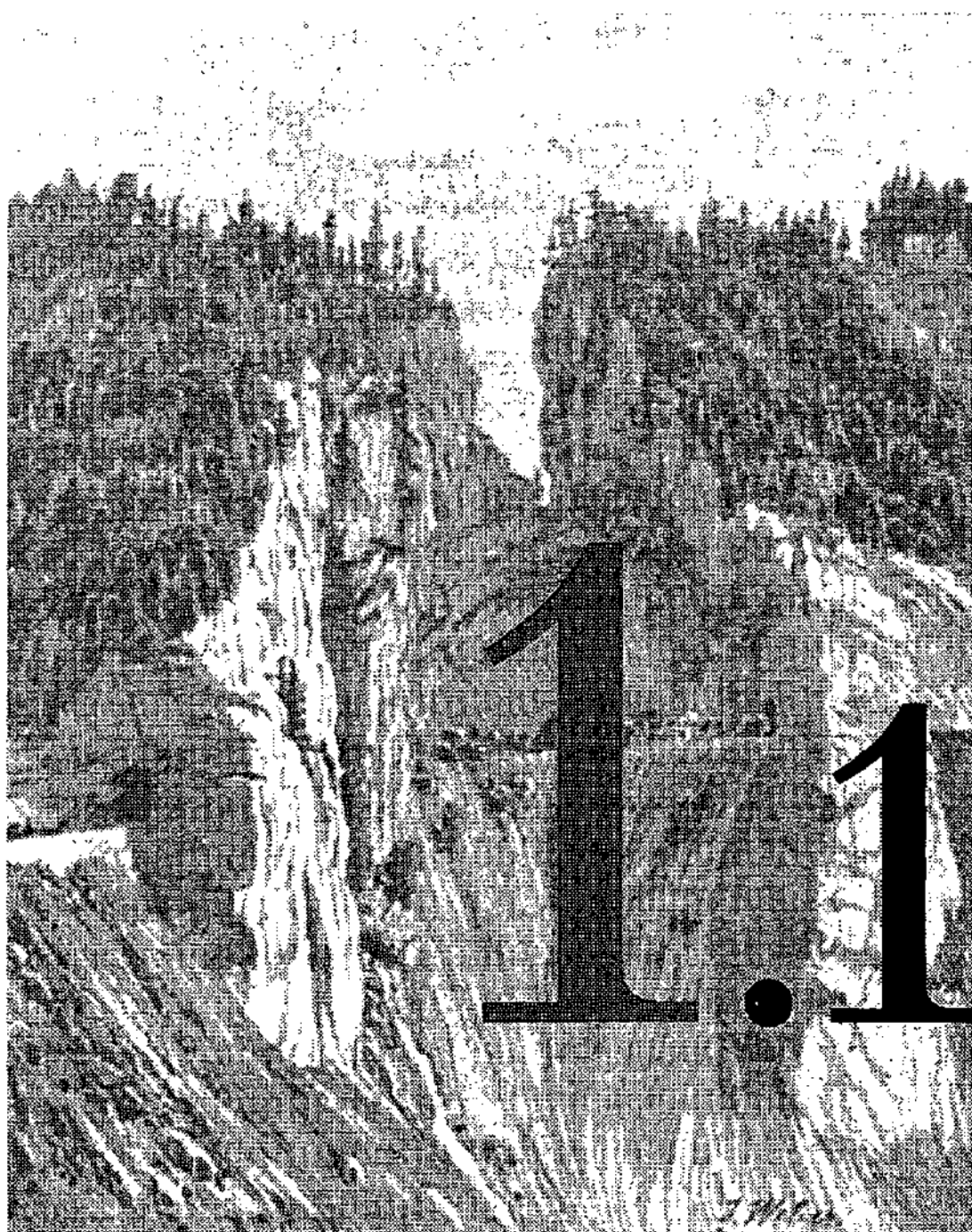
1

*Ainsi toujours poussé vers de nouveaux rivages,
Dans la nuit éternelle emporté sans retour,
Ne pourrons nous jamais sur l'océan des âges
Jeter l'ancre un seul jour ?*

Le Lac 1820 Alphonse de LAMARTINE

Gravure du Musée d'Histoire du Locle montrant le Col-des-Roches vu du côté des Brenets. Dépourvue des arbres masquant actuellement le site, cette gravure illustre de manière saisissante l'encoignure érodée par les torrents qui ont débordé l'ensellement du Col, notamment à l'époque würmienne, in Burger, Schaer, 1996.

Cadre général de l'étude



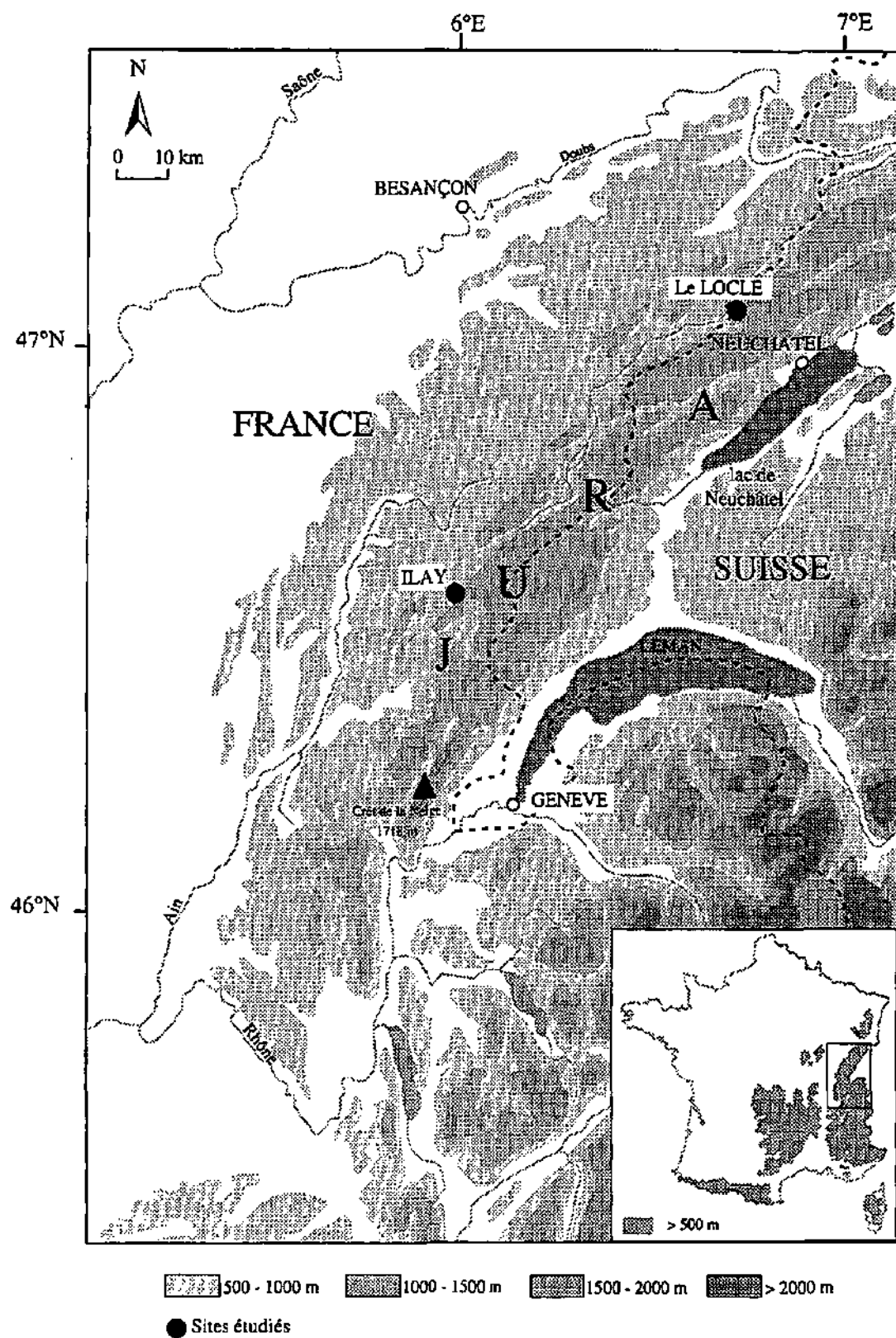


Figure 1.1 : Localisation des sites étudiés

Cadre général de l'étude

1. LA CHAÎNE JURASSIENNE

1.1. CADRE GÉOGRAPHIQUE

La chaîne du Jura s'allonge en un arc montagneux à convexité Nord-Ouest, depuis les Alpes au Sud jusqu'aux contreforts de la Forêt Noire au Nord-Est (Chauve, 1975 ; Debelmas, 1974).

La dissymétrie de son relief d'Ouest en Est lui confère également une originalité certaine, due en partie à des plateaux étagés qui se succèdent à l'Ouest pour atteindre la Haute-Chaîne, alors que le rebord oriental s'abaisse brusquement sous la plaine molassique suisse.

Le gradient altitudinal, régulièrement croissant dans le Jura septentrional, du Nord-Ouest au Sud-Est, est également une particularité de cette chaîne. Le Lomont culmine à 600 m dans le jura septentrional, dans le Jura central les altitudes avoisinent 1200 m, alors qu'au Sud dans le Jura Gessien, le Crêt de la Neige culmine à 1718 m (figure 1. 1).

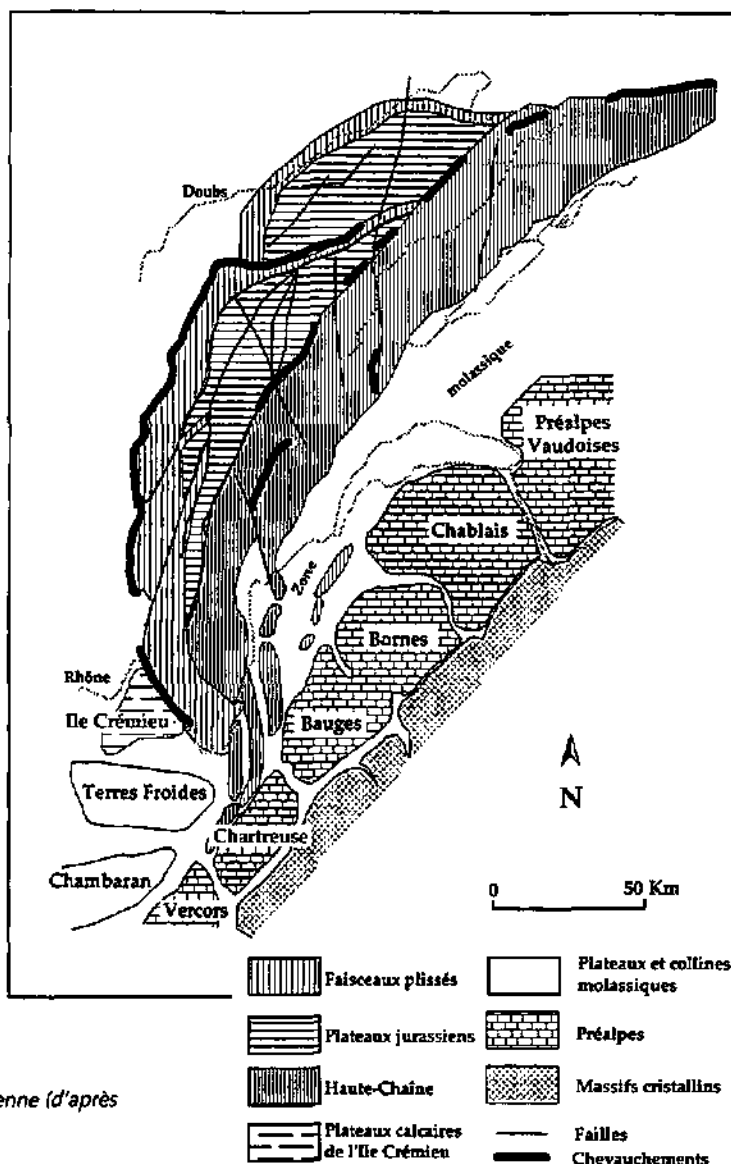


Figure 1.2 : Aspect structural de la Chaîne jurassienne (d'après Chauve, 1975)

1.2. CADRE GÉOLOGIQUE

1.2.1. Esquisse structurale

La chaîne jurassienne se présente sous la forme d'une alternance de zones plissées et de zones tabulaires à sub-tabulaires séparées par des failles. Trois domaines peuvent être individualisés (figure 1. 2) :

- Les zones pré-jurassiennes (territoire de transition entre la Bresse et le Bassin Parisien) sont constituées de couches tabulaires Cénozoïques ;

- Le jura externe, partie convexe de l'arc qui est constitué des plateaux du Dogger et du Malm et des faisceaux bordant la chaîne ; ces derniers sont formés par des petits synclinaux à fonds Jurassique Supérieur et/ou Crétacé et d'anticlinaux à coeur Trias-Lias (Debelmas, 1974) ;

- Le Jura interne correspond à la partie concave en bordure de la plaine molassique suisse, ce domaine porte encore le nom de Jura plissé, de Faisceau Helvétique ou encore de Haute-Chaîne ; c'est un bourrelet montagneux parallèle à la dépression molassique suisse, constitué de plis parallèles orientés Nord-Sud ; les formations du Jurassique Supérieur composent les anticlinaux alors que les formations du Crétacé constituent le coeur des synclinaux.

1.2.2. Les formations glaciaires

Les premières observations relatives aux formations glaciaires jurassiennes datent de 1782 (Deluc, 1838). Cinquante ans plus tard, un débat prit place, alimenté par ces premières observations relatives aux blocs erratiques allochtones. Ce débat dura près de deux siècles (Campy, 1982).

L'aire de répartition de la glaciation rissienne originaire des Alpes est délimitée par des blocs, des galets et des lambeaux de moraines ou de cailloutis dépassant en altitude et en extension celle des dépôts würmiens. Cette importante calotte glaciaire pouvait être alimentée par des précipitations locales (Nussbaum, Gyax, 1935 ; Aubert, 1965 ; Campy, 1982) (figure 1.3).

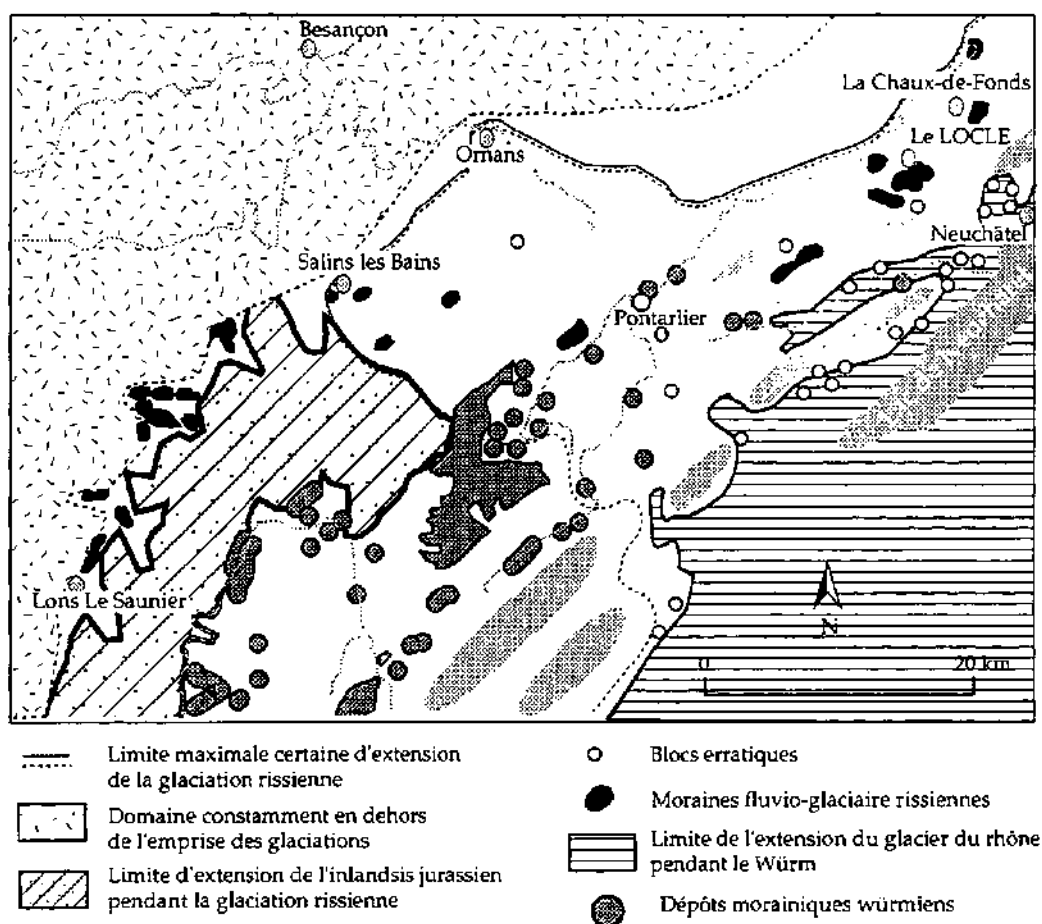


Figure 1.3 : Maxima d'extension des glaciers rhodaniens et jurassiens pendant le Riss et le Würm d'après Nussbaum, Gyax, (1935)

Cadre général

L'hypothèse de l'existence d'un glacier jurassien émise depuis 1843 par Agassiz, et corroborée par d'autres observations (Guyot, 1843 ; Pidancet, Lory, 1847) n'a pas été retenue à cette époque. Cette hypothèse d'une calotte glaciaire jurassienne unique est confortée en 1935 par les travaux de Nussbaum et Gygax sur la base d'une différenciation dans la composition des dépôts morainiques externes attribués au Riss. En 1965, Aubert argumente encore plus solidement cette hypothèse concernant la glaciation würmienne sur la base de nouvelles observations et de la réinterprétation des données anciennes.

Campy (1982) entreprend d'aller plus loin à travers des études sédimentologiques de ces formations glaciaires. Selon lui, les reliefs du Haut-Jura ont été recouverts par des glaces d'origine locale pendant le Würm. Les glaciers alpins venaient, à l'Est, au contact de cette calotte jurassienne (Campy, Arn, 1991). La glace, comparable à un vaste dôme d'orientation Sud-Ouest/Nord-Est, épousait donc la topographie de la chaîne, recouvrant les plateaux et surcreusant les vallées et les dépressions. Le dôme se divisait en plusieurs langues glaciaires, empruntant des vallées préexistantes (langue de Champagnole, langue de Doucier...) (Campy, 1982). Des lacs proglaciaires marquaient la limite de l'extension maximale de ces langues de glace (figure 1. 4).

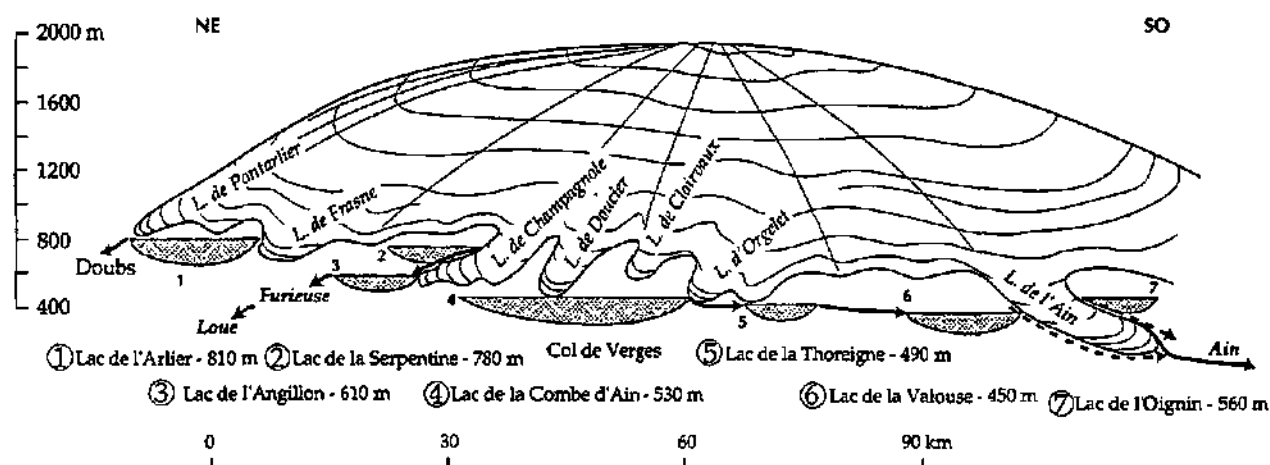


Figure 1.4 : Calotte glaciaire jurassienne et lacs proglaciaires d'après Campy, (1982)

1.3. CADRE CLIMATIQUE

Le climat constitue un des traits fondamentaux de cette région. Par les contraintes qu'il impose, il influence, parfois de manière déterminante, les équilibres du milieu naturel, la dynamique et la répartition des populations. Par l'organisation de son relief autant que par sa situation, le Jura est soumis à des conditions climatiques originales à l'intérieur même de la chaîne.

Le climat de la chaîne jurassienne varie graduellement avec l'altitude. Les moyennes annuelles des précipitations (environ 1000-1200 mm/an) et des températures (environ 10-13 °C) sont sensiblement les mêmes pour le Jura occidental et méridional. A l'opposé, au-delà de 920 m d'altitude, la Haute-Chaîne reçoit de 1500 à 2000 mm/an de précipitations pour des températures moyennes annuelles variant de 6 à 8 °C (figure 1. 5).

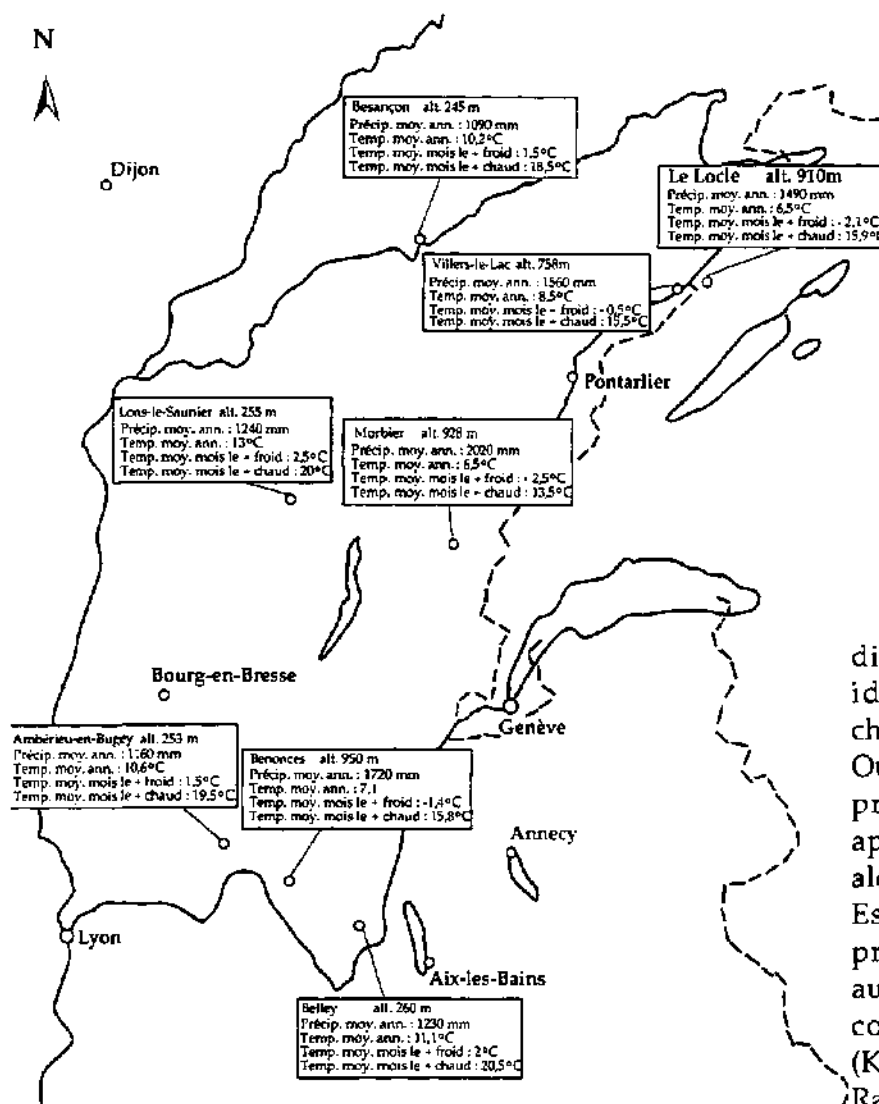


Figure 1. 5 : Quelques paramètres climatiques de la Chaîne jurassienne (d'après Ruffaldi, 1993)

Les vents ont une direction privilégiée, identique à l'axe de la chaîne soit Nord-Est/Sud-Ouest. Les vents dominants provenant du Sud-Ouest, apportent pluies et neige alors que le vent du Nord-Est (la bise), sec et froid, provoque des gelées et augmente en fréquence au cours des mois d'hiver (Kessler, Chambraud, 1986 ; Rameau, Richard, 1990).

1.4. CADRE PHYTOGÉOGRAPHIQUE

La variété des paysages et la diversité du tapis végétal sont liées à la morphologie et à la nature de la roche mère, dans quasiment toute la chaîne. En effet, la présence de bancs calcaires alternant avec des marno-calcaires et des marnes détermine la répartition de la végétation également influencée par l'altitude, le climat et le type d'exposition purement stationnel.

Des différences importantes dans la végétation conduisent à diviser le massif du Jura en trois secteurs principaux (Royer, 1991) (figure 1. 6) :

- Le Jura occidental ;
- Le Jura méridional ;
- Le Jura oriental, lui même subdivisé en Jura septentrional, Jura central et Jura austroriental.

Cadre général

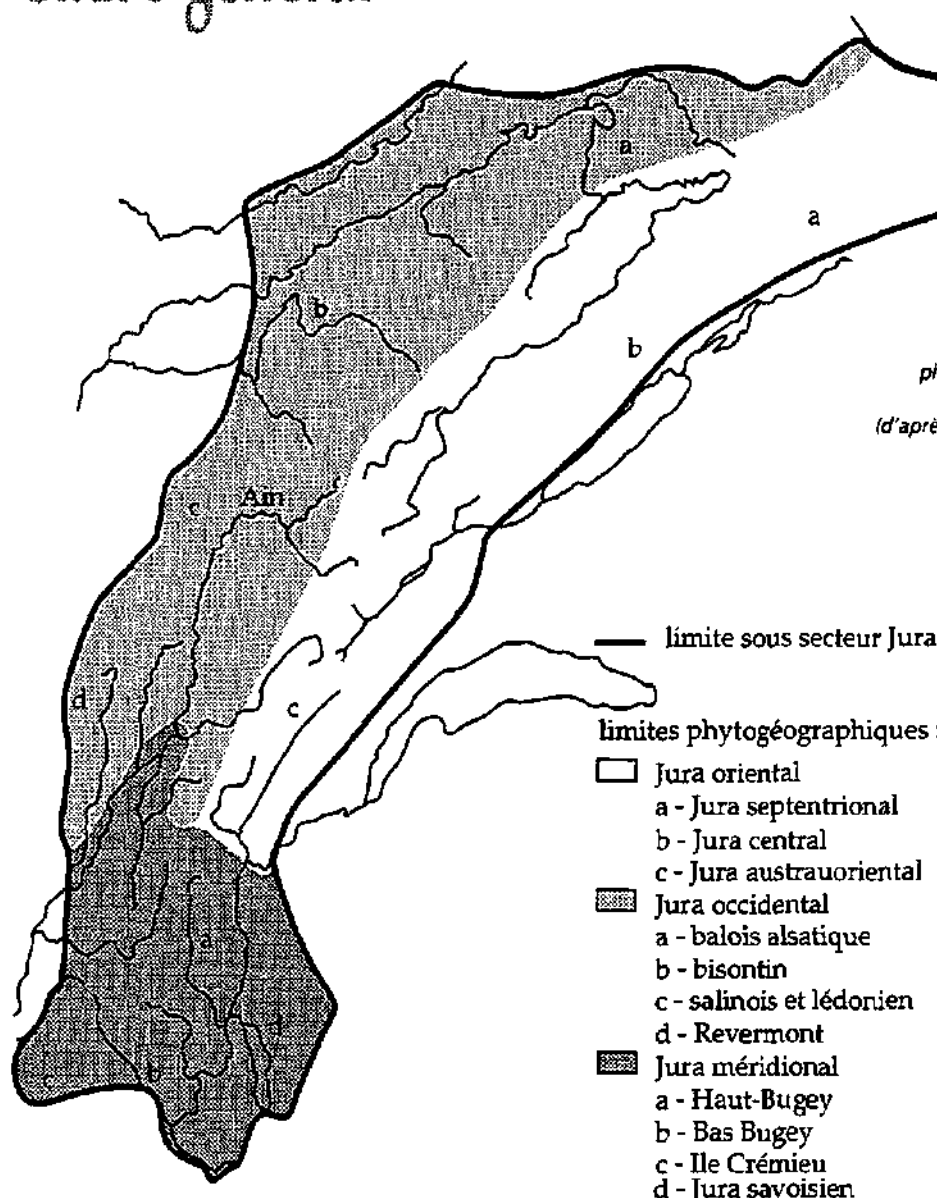


Figure 1.6 : Cadre phytogéographique de la Chaîne jurassienne (d'après Royer, 1991 ; Ruffaldi, 1993)

Le Jura occidental qui correspond au Jura tabulaire et aux faisceaux est dépourvu d'éléments de la flore alpine, mais également d'éléments d'origine artico-alpine et d'éléments boréo-arctique des tourbières. Il est toutefois caractérisé par une certaine richesse en espèces subméditerranéennes.

Le Jura méridional a la particularité de présenter des éléments de transition entre les séries de végétation médioeuropéennes et subméditerranéennes (Ruffaldi, 1993).

Le Jura oriental correspond à la Haute-Chaîne. De très nombreuses tourbières riches en espèces artico-alpines et boréo-arctiques se rencontrent dans le Jura central. Le Jura austroriental s'enrichit en espèces alpines et artico-alpines du fait de l'accroissement altitudinal (Royer, 1991 ; Ruffaldi, 1993).

Certaines zones phytogéographiques s'expliquent par des conditions édaphiques particulières régnant dans les zones palustres et lacustres dont l'origine est liée à la présence de niveaux imperméables : argiles fluvio-glaciaire, faciès marneux du substrat. Si les fonds des vallées sont occupés par les prés, les pâturages, les cultures et les marais ; les anticlinaux sont quant à eux recouverts de forêts et de pâturages boisés (Gallandat, 1982).

2. PRÉSENTATION DES SITES

2.1. LE MARAIS DU COL-DES-ROCHES, COMMUNE DU LOCLE (NEUCHÂTEL - SUISSE)

2.1.1. Situation géographique

La région du Locle est située à l'extrémité Nord-Est de l'arc jurassien (figures 1. 1 et 1. 7). A cet endroit, l'altitude des reliefs ne dépasse guère 1300 mètres (Grand Som Martel : 1330 mètres), à l'exception des Vanarins (1400 mètres) et du Crêt de Conté (1404 mètres), tous deux situés sur le territoire helvétique.

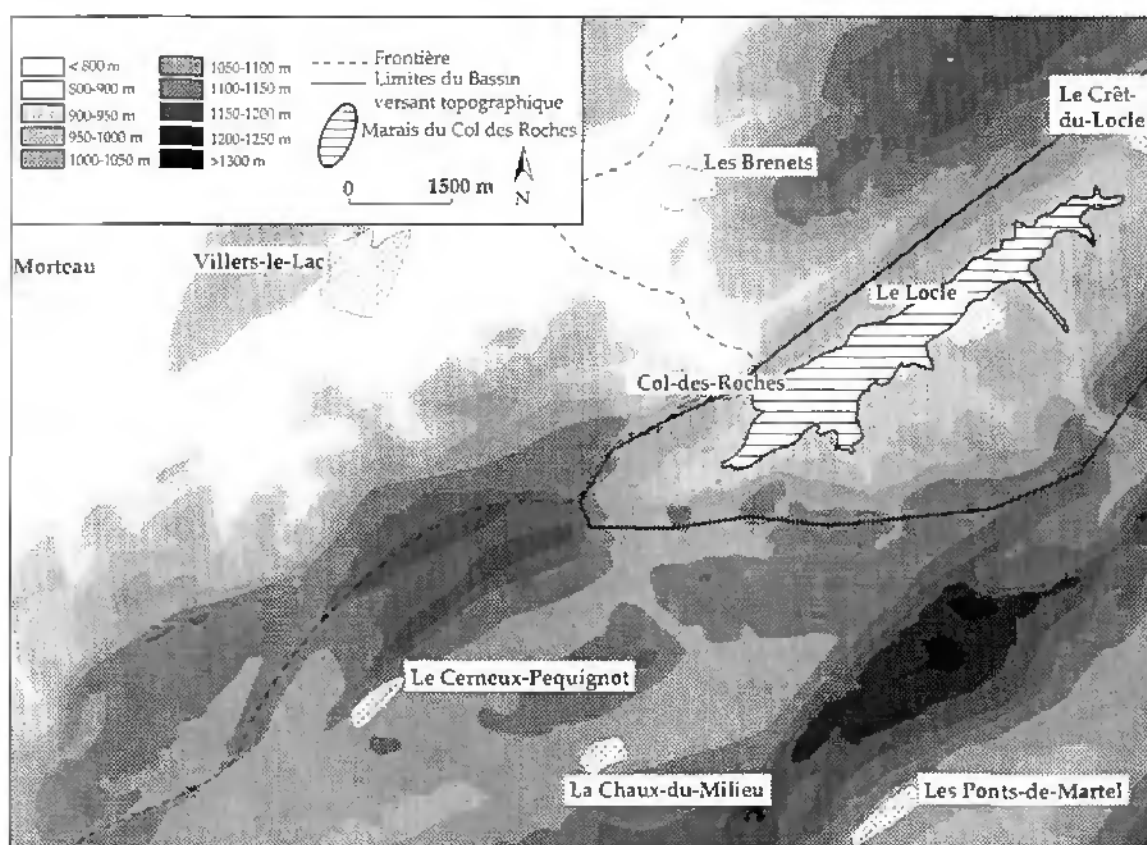


Figure 1.7 : Situation géographique du Marais du Col-des-Roches (Neuchâtel, Suisse)

Le Marais du Col-des-Roches occupe, à une altitude de 915 mètres, l'extrémité occidentale du synclinal Le Locle - La Chaux-de-Fonds (Suisse septentrionale). Ce Marais est séparé de la vallée du Doubs par un relief anticlinal orienté Nord-Est/Sud-Ouest. Au Sud-Ouest, un autre relief le sépare de la vallée des Ponts-de-Martel.

2.1.2. Situation hydrogéologique

La zone dite du "Marais" correspond à une partie d'un ancien lac qui occupait toute la dépression du Locle, depuis le Crêt-du-Loche au Nord-Est jusqu'au lieu dit "Les Calames".

Cadre général

La superficie de cet ancien lac couvre approximativement 67 ha. Sa longueur avoisine 2250 mètres, alors que sa largeur maximale atteint 600 mètres. Le sommet du remplissage sédimentaire du lac au lieu dit "Le Marais" se trouve à une altitude comprise entre 910 et 915 mètres. La dépression du lac du Locle correspond à un bassin versant topographique de 26 km² (Burger, Schaer, 1996).

Le lac devait être alimenté par des ruissellements et des apports issus de plusieurs vallées transversales : "La Combe Girard", "La Combe Robert" et "La Grecque" (Burger, Schaer, 1996). L'émissaire devait être constitué par un important réseau karstique au niveau des calcaires portlandiens à l'extrémité du Marais du Col-des-Roches (entre les Roches Houriet et les Roches Voumard). Il est probable que le col ait joué le rôle d'exutoire, la vallée de la Rançonnière collectant les eaux via la vallée du Doubs. Depuis 1805, un souterrain assure l'évacuation et le drainage du Marais. Ce système est à l'origine de la disparition progressive du lac résiduel qui était encore visible au début de ce siècle (cf. page de couverture).

2.1.3. Cadre géologique quaternaire

2.1.3.1. Historique

Les environs du Locle et de la Chaux-de-Fonds ont fait l'objet de nombreuses études géologiques (Nicolet, 1839 ; Desort, 1842 ; Jaccard, de 1858 à 1892). C'est Favre (1911) qui a publié la première carte géologique du synclinal du Locle - La Chaux-de-Fonds ; cette ancienne cartographie constitue la base de la carte géologique au 1/50000 ème de Morteau éditée en 1960 par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (figure 1.8). Dans ce travail, Favre préféra «étudier les tourbières avec détail, pensant qu'il serait utile d'en fixer les caractères avant qu'elles aient complètement disparu, soit par l'exploitation, soit par le dessèchement». Il ne reprit donc pas l'étude des formations jurassiques, crétacées et tertiaires, s'attachant à étudier les formations négligées jusqu'ici. Les travaux les plus récents concernent l'étage Oeningien et ses subdivisions (Kübler, 1962 a, b) et les formations crétacées (Turberg, 1987). Aucune étude détaillée n'a été consacrée aux formations quaternaires, qu'il s'agisse des dépôts morainiques ou des remplissages sédimentaires.

Les formations glaciaires ne jouent qu'un rôle secondaire dans la vallée du Locle - La Chaux-de-Fonds, ce ne sont que de minces dépôts de moraines de fond et de moraines de retraits ainsi que de blocs erratiques de faibles tailles (Favre, 1911) (figure 1.8).

a) Les témoins de la glaciation rissienne, le glacier du Rhône

Les vallées internes situées au nord du Haut Jura ont été atteintes par les langues glaciaires au moment de l'extension maximale de la glaciation du Riss (Nicolet, 1839 ; Jaccard, 1892 ; Du Pasquier, 1897 ; Favre, 1911 ; Nussbaum, Gygax, 1935). Les témoins de cette extension sont la présence des lehms à galets alpins (schistes, quartzites, gneiss à paragonite, schistes chloriteux), des restes d'*Elephas primigenius* (Jaccard, 1892) et d'une grande quantité de blocs erratiques, toujours de petite taille. La limite altitudinale du glacier du Rhône à l'époque du Riss est fixée entre 1140 et 1160 mètres (Jaccard, 1892 ; Favre, 1911) (figure 1.9).

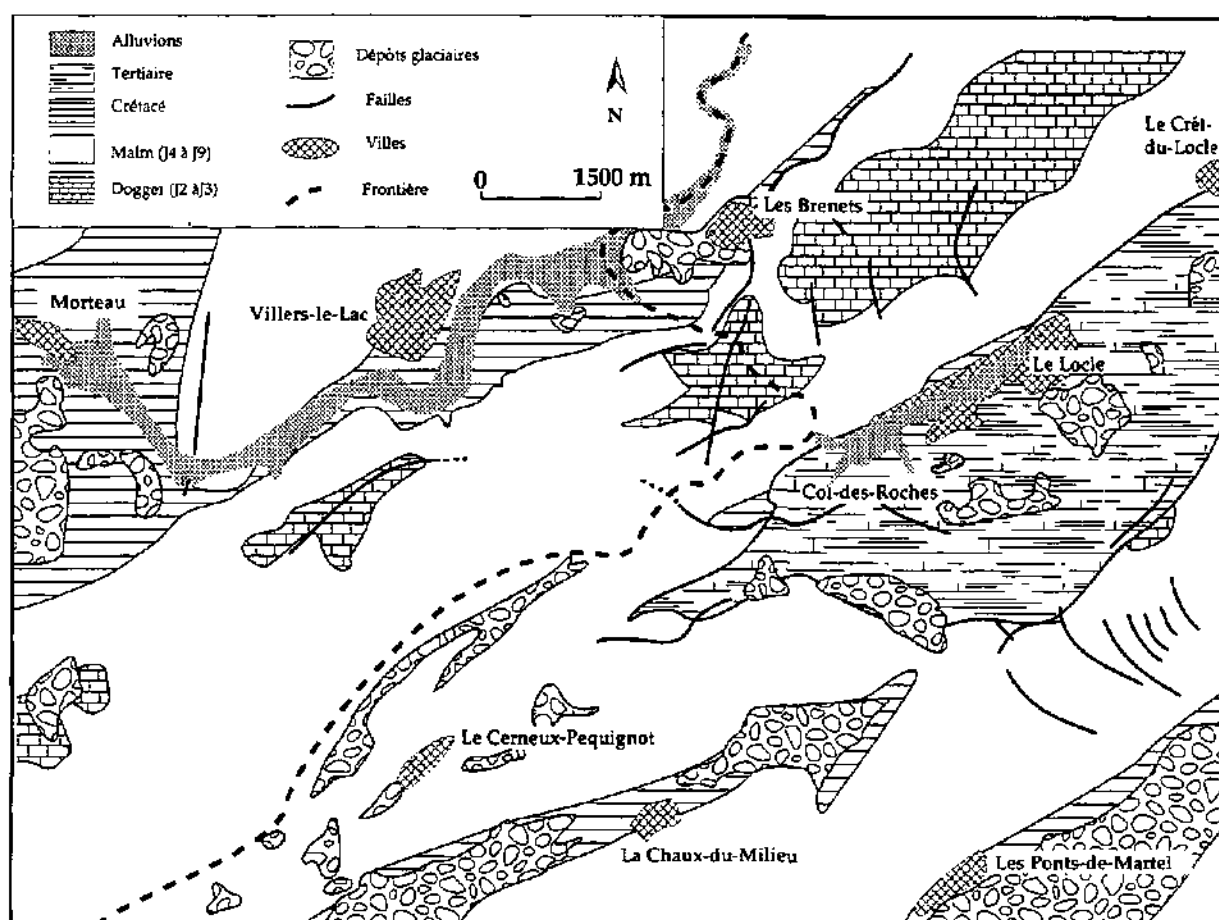


Figure 1.8 : Carte géologique simplifiée des environs du Locle
(D'après la carte géologique de Moreau 1960 1/50000e, Feuille XXXV-24)

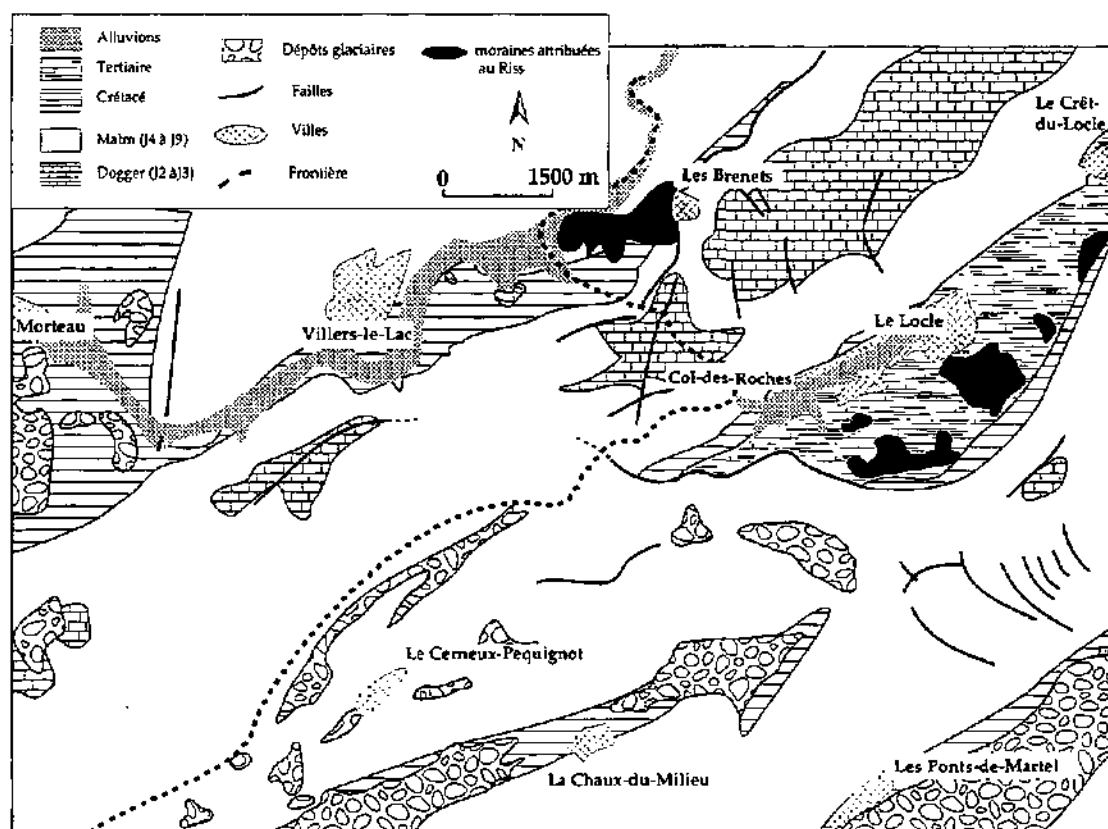


Figure 1.9 : Attribution chronologique d'après Nussbaum et Gyax (1935) des moraines du Locle et de ces environs à la glaciation du Riss

Cadre général

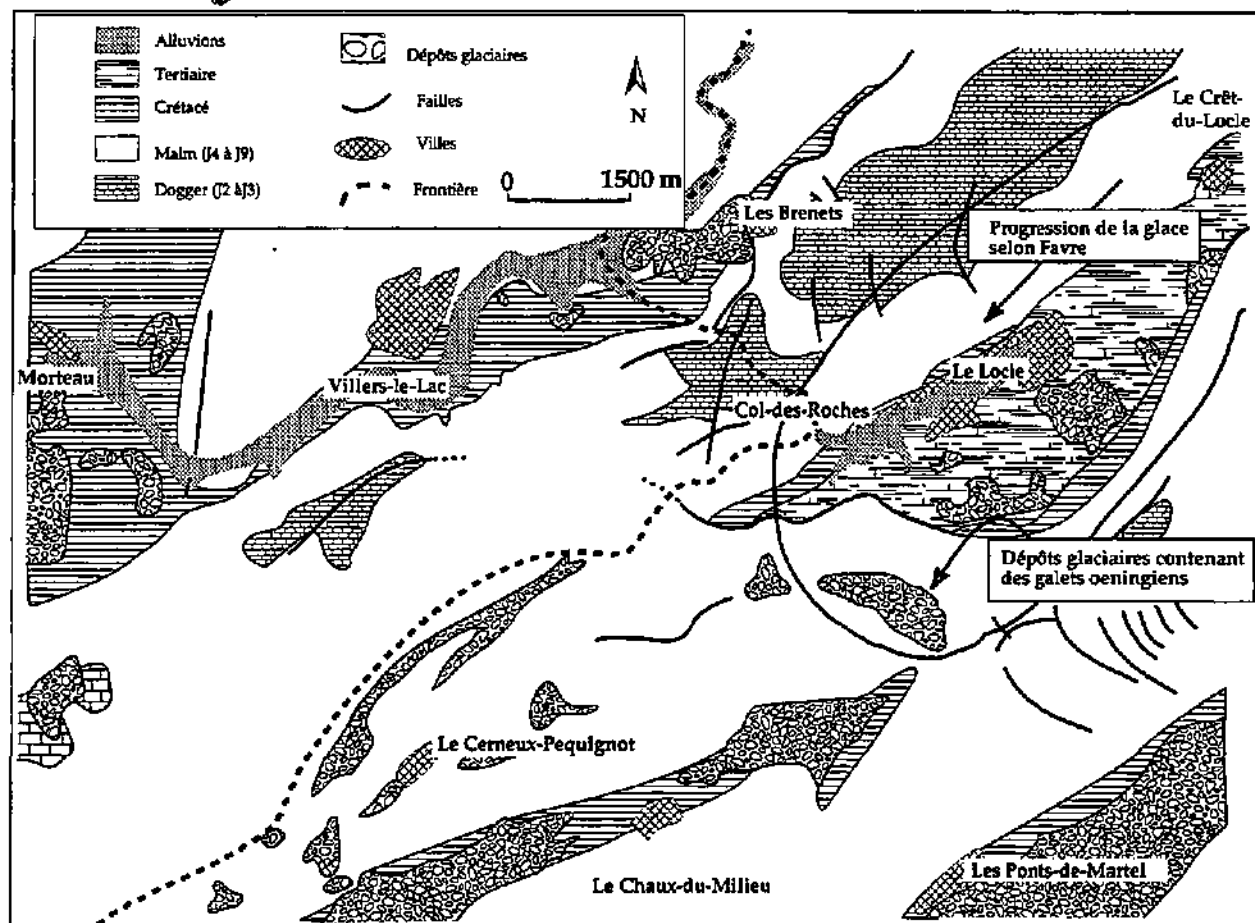


Figure 1.10 : Attribution chronologique d'après Favre (1911) des moraines du Locle et de ses environs à la glaciation du Würm.

b) Les témoins de la glaciation würmienne, la calotte jurassienne

Favre (1911) n'exclue pas, dans la région, la présence de dépôts morainiques jurassiens d'âge antérieur au Riss. Mais selon lui, l'invasion du glacier rhodanien a dû les faire disparaître. Par contre, les moraines jurassiennes, contemporaines de la glaciation würmienne, sont abondamment représentées. Cette existence est attestée par la présence de galets plus ou moins anguleux appartenant exclusivement à des niveaux kimméridgiens et portlandiens (Jurassique Supérieur). La proportion d'éléments allochtones (alpins) est faible ; ce sont surtout des quartzites remaniés lors de la glaciation. Ces dépôts morainiques couvrent exclusivement les collines du versant Sud-Est de la vallée du Locle (Les Jeannerets, Les Replattes, La Joux Pélichet, Le Montperreux, Les Cernayes) figure 1.10.

Le dépôt morainique le plus important forme une colline de 1,5 km de longueur sur 300 mètres de largeur et 30 mètres de hauteur entre la vallée du Locle et celle de la Chaux-du-Milieu (figure 1.10). Les galets qui la composent sont de nature autochtone, kimméridgienne et portlandienne pour la quasi totalité. Un faible nombre de galets est d'origine lointaine ; leur nature est surtout quartzitique. La particularité de ce dépôt est de présenter des galets oehningiens de nature siliceuse et fossilifère à 1130 mètres d'altitude. Leur présence indiquerait qu'ils ont été transportés là par une moraine frontale d'un glacier remplissant la vallée du Locle et débordant dans la vallée de la Chaux-du-Milieu. Cette hypothèse implique l'existence d'un glacier suffisamment puissant pour avoir transporté du matériel de bas en haut, puisque les gisements actuels d'Oeningien atteignent tout au plus 1050 mètres d'altitude (Favre, 1911).

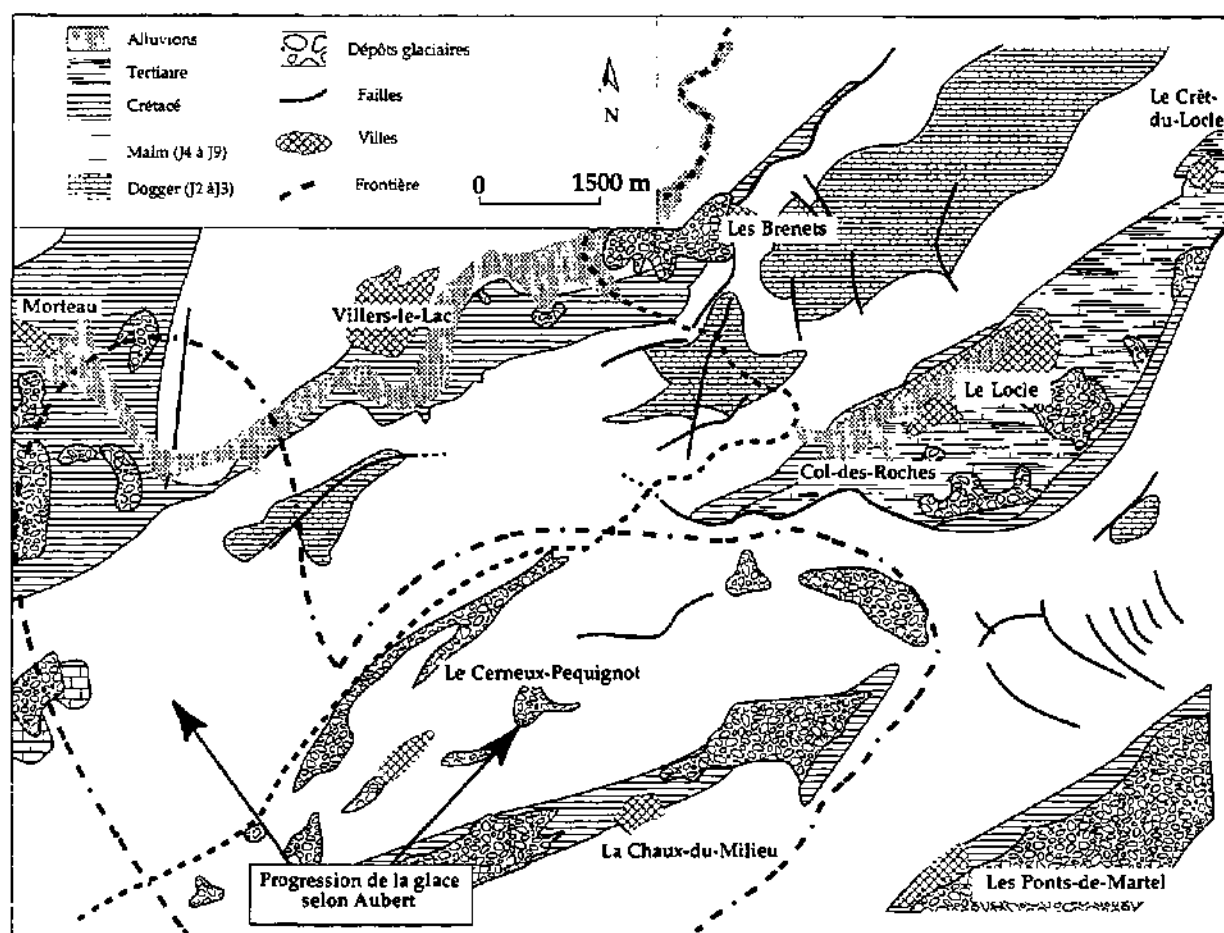


Figure 1.11 : Attribution chronologique d'après Aubert (1965) des moraines du Locle et de ses environs à la glaciation du Würm.

A partir de l'analyse des proportions d'éléments alpins contenus dans l'ensemble de ces dépôts morainiques, Nussbaum et Gyax en 1935, en attribuent l'origine à un épisode glaciaire antérieur au Würm.

A l'opposé, Aubert (1965) a montré qu'il s'était formé, au maximum würmien, une véritable calotte de glace dans la partie occidentale de l'arc Jurassien : elle s'étendait du décrochement de Vallorbe-Pontarlier jusqu'à la vallée de l'Ain. Selon lui, les glaciers locaux devaient être minces et suffisamment puissants pour entraîner du matériel, mais pas assez pour éroder la roche mère. La vallée de la Brévine a dû être recouverte par une calotte qui devait s'étendre jusqu'au vallon du Locle, sans atteindre La Chaux-de-Fonds où les dépôts morainiques sont absents. La quantité de matériel morainique déposée dans le vallon de la Brévine-Chaux-du-Milieu témoigne de l'importance de cette calotte (figure 1.11).

2.1.3.2. L'englacement würmien de la vallée du Locle

En fonction de la répartition géographique, de la position altitudinale de ces dépôts glaciaires et des données bibliographiques qui viennent d'être exposées, il est possible de proposer un schéma de la mise en place de ces dépôts. Pour cela il faut envisager une confluence de langues glaciaires vers la dépression du Locle (figures 1.12 et 1.13) :

Cadre général

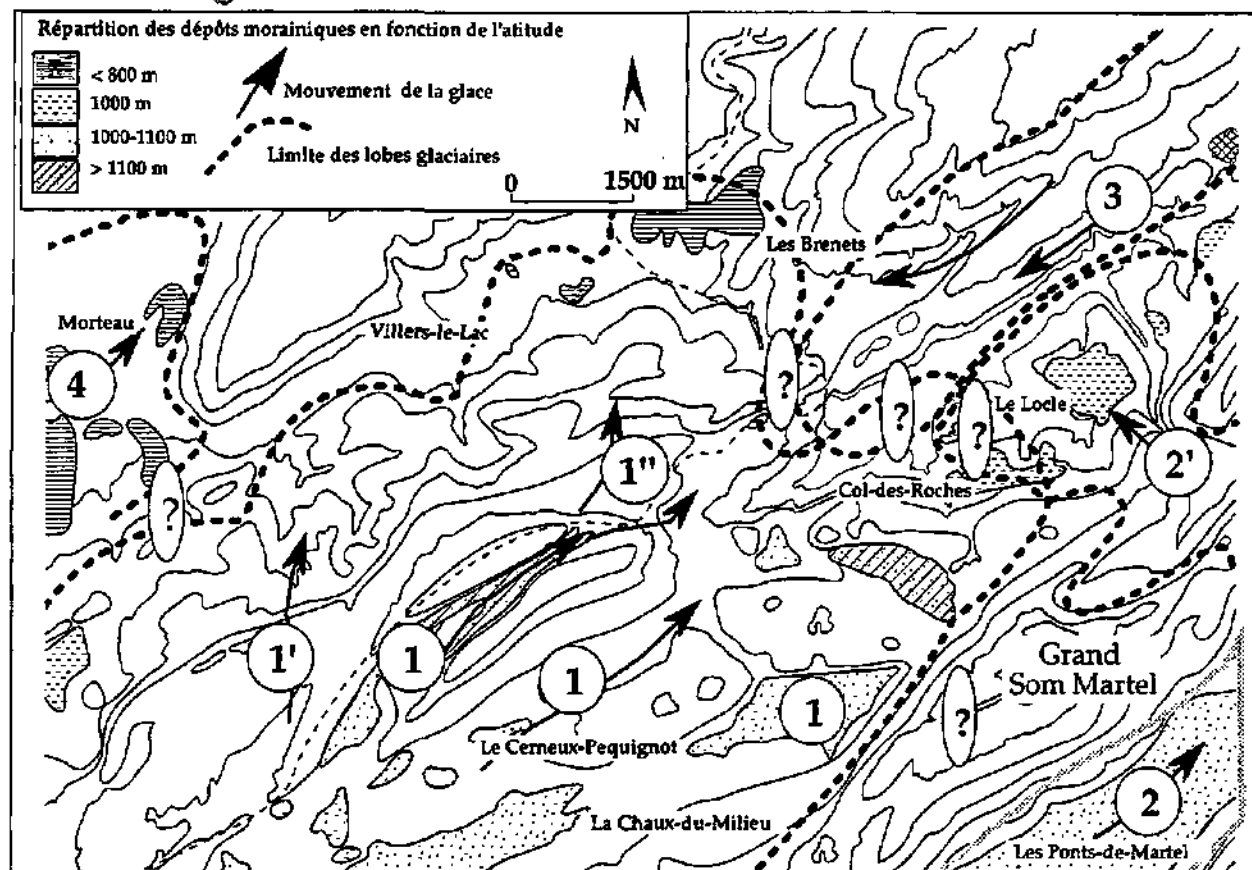


Figure 1.12 : Propositions des limites potentielles d'extension de la langue glaciaire dans la zone du Locle - la Brévine (au Würm)

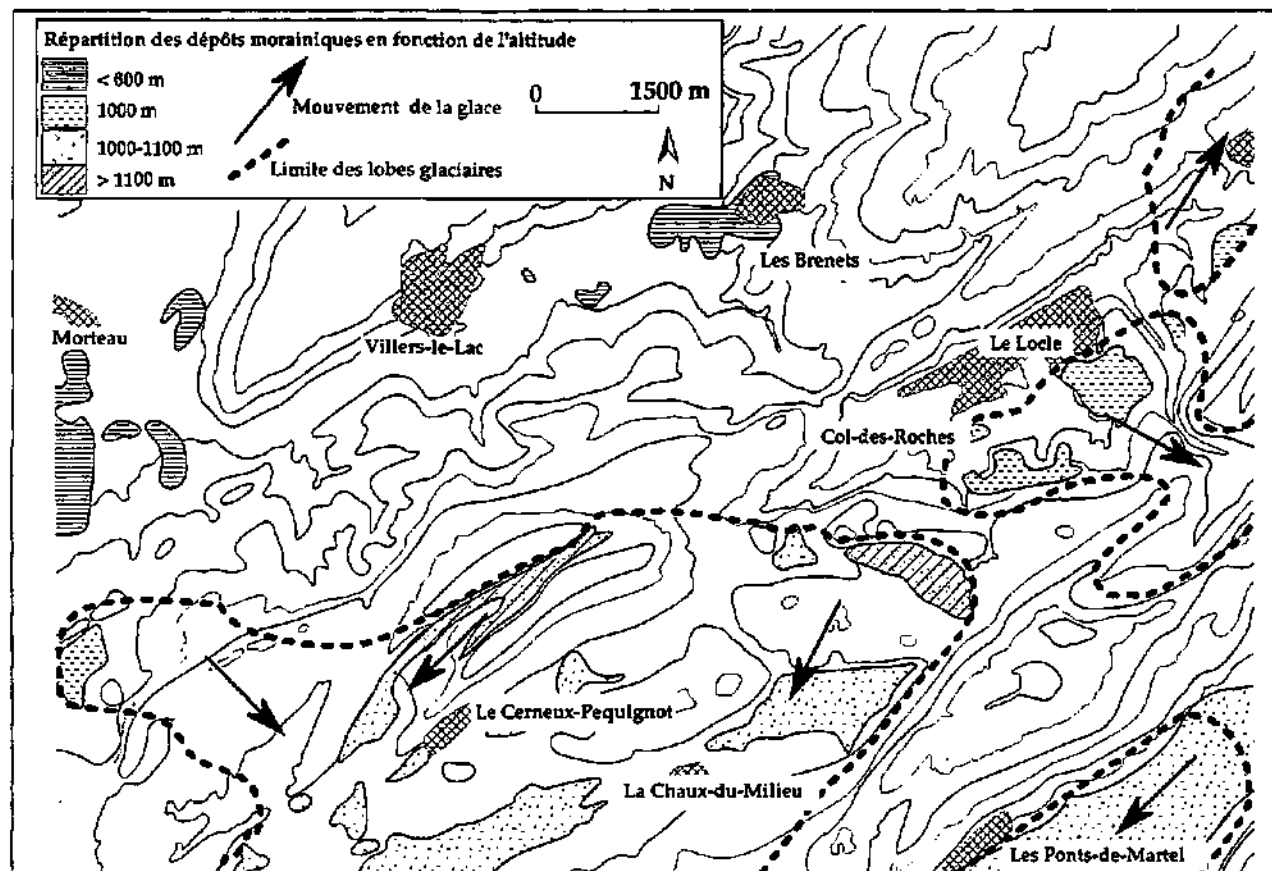


Figure 1.13 : Stade de retrait présumé des différentes langues glaciaires du Locle - La Brévine

- La plus importante est vraisemblablement celle qui venait du Sud-Ouest de la Brévine/la Chaux-du-Milieu (1) ; elle pouvait se déverser, par des régions où la topographie le permettait, vers le Nord en direction de Morteau (1') et en direction de Villers-le-Lac (1''). Le relief de la chaîne du Grand Som Martel, au Sud-Est, devait être infranchissable et favorisait ainsi le déversement dans la vallée du Doubs d'une part, et la progression de la langue en direction du Locle d'autre part.

- Une avancée glaciaire, parallèle à celle de la Brévine, devait emprunter la vallée des Ponts-de-Martel en direction du Nord-Est (2). Il est probable qu'une partie de cette langue rejoignait la vallée du Locle depuis le secteur de "l'Entre deux Monts" (2').

- Le val de Morteau a gardé les traces d'une alimentation en matériel morainique déposé par une langue de glace venant du secteur pontisalien en suivant l'axe de la vallée actuelle du Doubs (4).

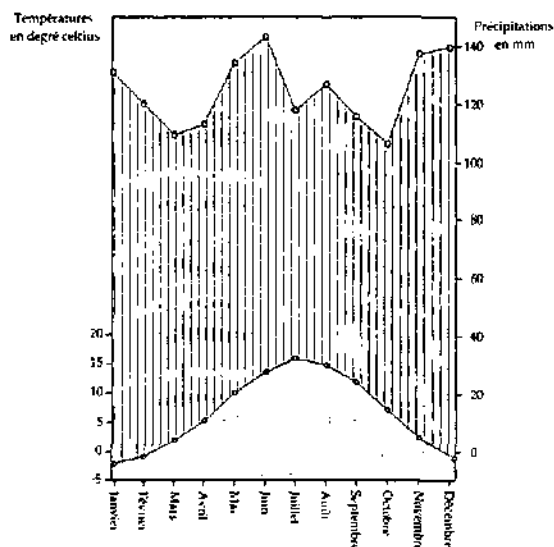
- Malgré l'absence de traces de dépôts glaciaires dans le secteur de la Chaux-de-Fonds, il n'est pas exclu qu'une alimentation en glace se soit opérée depuis là (3).

- Le contact exact entre toutes ces langues glaciaires dans la vallée du Locle reste difficile à définir. Mais, au maximum d'extension würmien, cette vallée paraît totalement remplie par les glaces.

2.1.4. Éléments de climatologie

Les données météorologiques recueillies par les Services Industriels de la ville du Locle depuis près d'un demi-siècle environ permettent ici de souligner la position du site dans le contexte jurassien. La figure 1.14 est établie à partir des températures moyennes mensuelles et des précipitations moyennes mensuelles disponibles depuis 1949.

Figure 1.14 : Diagramme ombrothermique de la ville du Locle établi à partir des relevés journaliers effectués de 1949 à 1994



La température moyenne annuelle est de 6,5 °C, la température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de - 2,15°C alors que la température moyenne du mois le plus chaud (juillet) atteint 16 °C. La pluviosité moyenne annuelle atteint 1500 mm ; ces précipitations sont régulièrement réparties sur l'année (125 mm/mois), mais avec un léger déficit au printemps et en automne.

Cadre général

Le manteau neigeux peut apparaître dès octobre, mais plus fréquemment en novembre. La période d'enneigement maximale se situe aux mois de décembre et janvier (170 mm environ), mais elle est très variable d'une année à l'autre.

2.1.5. Particularités de la végétation actuelle du Locle

Si les fonds des vallées sont occupés par les prés et pâturages et les marais, les anticlinaux sont recouverts de forêts et de pâturages boisés largement tributaires du climat et des actions anthropiques.

La végétation actuelle de la région du Locle-La Chaux-de-Fonds appartient à la série montagnarde, plus précisément à la série de la hêtraie-sapinière. Le substrat induit la présence de la série thermophile et calcicole du hêtre à *Carex alba* et de la série froide et calcicole du hêtre à *Cardamina heptaphylla*.

- La série de l'épicéa se rencontre habituellement plus au sud de la région du Locle ; sa présence très abondante sur le site est le résultat de la sylviculture.

- La série de la hêtraie-sapinière est bien représentée dans la région locloise ; elle se développe à partir de 800 m d'altitude. Le hêtre et le sapin présentent une égale vigueur ; ils sont accompagnés de l'épicéa, de l'érable faux platane et du sorbier des oiseleurs. La strate arbustive est diversifiée. Des groupements nombreux dérivent de ce schéma. Les maigres groupements herbacés qui colonisent les dalles rocheuses sont à l'origine de la dénomination de "Chaux" (Burger, Schaer, 1996). Des pelouses très développées servent aux pâturages (pelouses à *Bromus erectus*, *Brachypodium pinnatum*, *Helianthemum ovatum*, *Plantago lanceolata*, *major* et *media*). Des prairies occupent également une part importante dans le paysage de la vallée Locloise (Burger, Schaer, 1996).

Les groupements arbustifs propres à la déprise pastorale sont riches en *Corylus avellana*, *Fraxinus excelsior* et *Acer pseudoplatanus*.

Des groupements de pentes (Roche Voumard) sont représentés par des érablaies où peuvent se développer les frênes et les noisetiers. L'épicéa peut dominer sur les pentes s'il a été planté, sinon il appartient aux groupements spécialisés de l'étage montagnard des stations climatiques froides exposées au nord sur des sols fissurés avec blocs.

2.2. LE LAC D'ILAY

2.2.1. Cadre géographique

La région d'Ilay est située dans la partie Sud-Ouest de l'arc jurassien (figure : 1.1).

Le lac d'Ilay ou lac de la Motte tient son nom de l'îlot boisé situé dans sa partie Est, et qui était jadis occupé par une abbaye (figure 1. 15).

La dépression lacustre a une orientation Nord-Est/Sud-Ouest. Elle est limitée à ses extrémités septentrionale et méridionale par des reliefs qui la séparent du lac de Narlay d'une part, et de la vallée du Hérisson d'autre part. Elle est bordée à l'Ouest par des reliefs à pente douce du plateau de Champagnole dont l'altitude moyenne est de 820 m (documents

du SRAE, 1986). D'une superficie de 72 ha, le lac d'Ilay s'étire sur plus de 1900 m, sa largeur maximale atteignant 400 m. Le plan d'eau se trouve à 774 m.

2.2.2. Cadre géologique

Ce lac occupe le fond d'un synclinal crétacé. Qualifié par Delebecque en 1898 de lac de "dépression centrale", il tire son origine comme ces voisins (Narlay, Grand et Petit Maclu...) de l'activité glaciaire (Campy, 1982) ayant affecté le Jura pendant le Würm (figure 1.16).

Situé dans la partie méridionale du faisceau de Syam, le synclinal crétacé est limité au Nord-Est par les dépôts morainiques de la vallée de la Panesière et par les affleurements calcaires barrémiens à son extrémité méridionale.

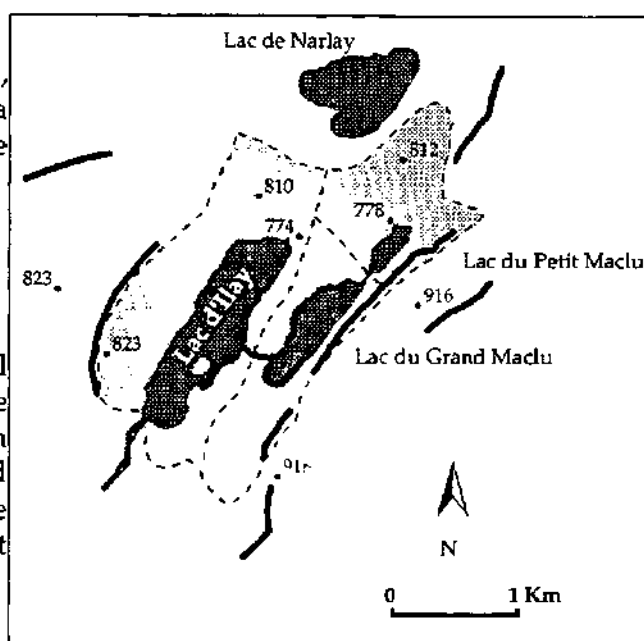
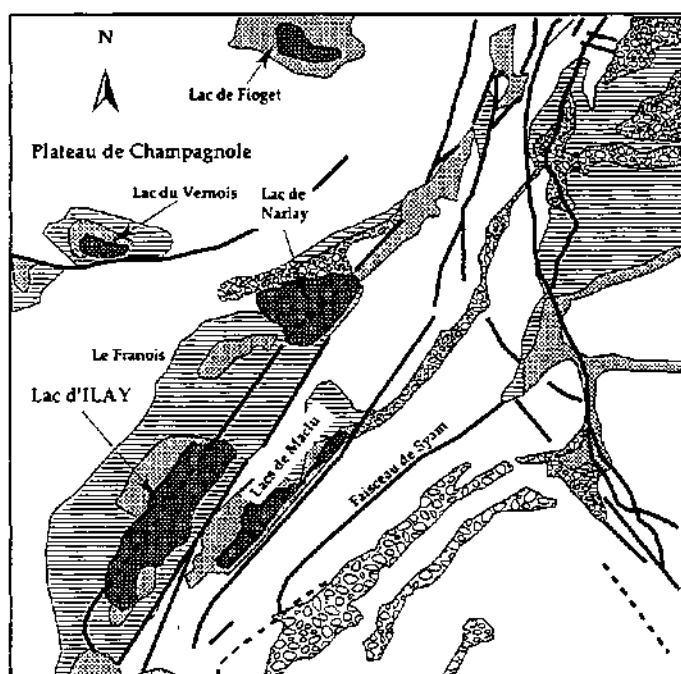


Figure 1.15 : Limites du bassin versant des lacs de Maclu et d'Ilay (Jura, France)

Ces cuvettes lacustres sont dominées à l'Est par les reliefs calcaires du Jurassique Supérieur, dépassant 900 m d'altitude. Elles sont bordées sur leurs flancs occidentaux par des collines valanginiennes et hauteriviennes aux contours plus arrondis (SRAE, 1985).



d'après carte géologique au 1/50 000e



Figure 1.16 : Carte géologique simplifiée des environs du Lac d'Ilay (d'après SRAE, 1985)

2.2.3. Éléments de climatologie

Les précipitations moyennes annuelles relevées à la station de Frasnois (800 m) sont élevées et comptent parmi les plus importantes de la région. Elles sont comprises entre 1800 et 2000 mm pour la période 1951-1970 (SRAE, 1986). En 1983, un maximum de 2189 mm est atteint avec plus de 50 jours de neige.

Les températures moyennes annuelles se situent aux environs de + 6 °C. Les conditions hivernales permettent la prise en glace des plans d'eau de la région pendant une durée de 4 mois en moyenne.

Cadre général de l'étude

2.2.4. La végétation actuelle à Ilay

La végétation actuelle du site d'Ilay appartient, comme celle du Locle, à la série montagnarde. Elle s'en distingue par des versants mieux exposés au soleil, abritant des pelouses et des fruticées xérophiles de l'étage montagnard inférieur et moyen. Des prairies mésophiles constituent la végétation bordant les abords immédiats du lac d'Ilay.

La végétation arborée est celle de la série thermophile du hêtre (*Fagus sylvatica*) à *Carex alba* (*Carici-Fagetum*). Il s'agit ici d'une variante alticole de la série sub-montagnarde du hêtre et des chênes rencontrée dans la vallée du Hérisson toute proche. Le chêne est absent. Cette série affectionne les pentes ensoleillées de certains faciès calcaires à l'origine de sols bruns eutrophes peu profonds. La richesse arbustive de cette association lui confère sa particularité. Sur les sols les plus profonds, apparaissent les charmes (*Carpinus betulus*) et les frênes (*Fraxinus excelsior*).

Les versants froids (ubacs) sont couverts d'un sol riche et bien drainé. En situation abyssale (forte pente), ils sont colonisés par le hêtre et la cardamine (*Cardamine heptaphylla*), c'est l'association du *Cardamino-Fagetum*. Sur ces versants, le tilleul (*Tilia platyphyllos*) peut être rencontré abondamment ainsi que l'érable faux platane (*Acer pseudoplatanus*), l'orme (*Ulmus glabra*) et le frêne (*Fraxinus excelsior*).

Plus en altitude, la série de la hêtraie-sapinière (*Abieti-Fagetum*) est omniprésente, à l'Est des 4 lacs. Hêtre, sapin (*Abies alba*) et épicéa (*Picea abies*) présentent une vigueur comparable. L'érable (*Acer pseudoplatanus*) et le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) peuvent les accompagner. Les différentes strates arbustives sont d'une manière générale très diversifiées ; elles sont constituées par le noisetier (*Corylus avellana*), les ronces (*Rubus sp.*), le chèvrefeuille (*Lonicera xylosteum*), les framboisiers (*Ribes alpinum*) et les rosiers (*Rosa pendulina*).



Gravure des Moulins sous-terrains
du Col-des-Roches in Burger,
Schaer, 1996

Méthodes et Techniques



Foreuse APAGEO munie d'une tarière de 1.5 m, acquise avec la participation conjointe des laboratoires de Besançon, Neuchâtel, Marseille et Dijon (photographie : P. Schoellammer, Août 1993 dans le Marais du Col-des-Roches).

Méthodes et Techniques

1. LA RECONNAISSANCE DES CORPS SÉDIMENTAIRES

La reconnaissance de la nature et de la répartition des corps sédimentaires dans le paléolac du Col-des-Roches a été réalisée à partir d'une exploration par forages mécaniques et par une prospection utilisant des méthodes géophysiques de surface. Cette reconnaissance associe également les données fournies par plusieurs forages mécaniques à finalités géotechniques et hydrologiques effectués depuis un siècle dans le Marais du Col-des-Roches et la ville du Locle.

Les résultats de ces travaux sont à la base du choix de l'emplacement des forages récents. La campagne géophysique de novembre 1993 ne concerne que la partie du Marais, encore vierge de toutes constructions.

1.1. LES FORAGES ANCIENS

Les plus anciennes prospections sur le Marais du Locle remontent à 1858 (Jaccard, 1858 a et b). Le Canton de Neuchâtel souhaitait alors investir à cet endroit dans le but d'assécher et d'assainir le Marais ; la nature et la puissance des terrains devaient être reconnues auparavant. 25 forages ont été exécutés à intervalles réguliers parallèlement à l'axe du synclinal. Le plus profond a atteint la cote de 18 mètres. Les observations faites à

l'époque permirent le classement des sédiments en 6 unités lithologiques distinctes. La présence d'éléments des formations encaissantes mêlés aux dépôts quaternaires est alors soulignée (Jaccard, 1858 a, p. 438). L'épaisseur de la tourbe est connue depuis cette époque : 6 à 9 mètres selon les points forés.

Des forages plus profonds, effectués au moyen d'une tarière datent de 1903 ; ils étaient destinés à connaître la nature du sous-sol préalablement à la construction de

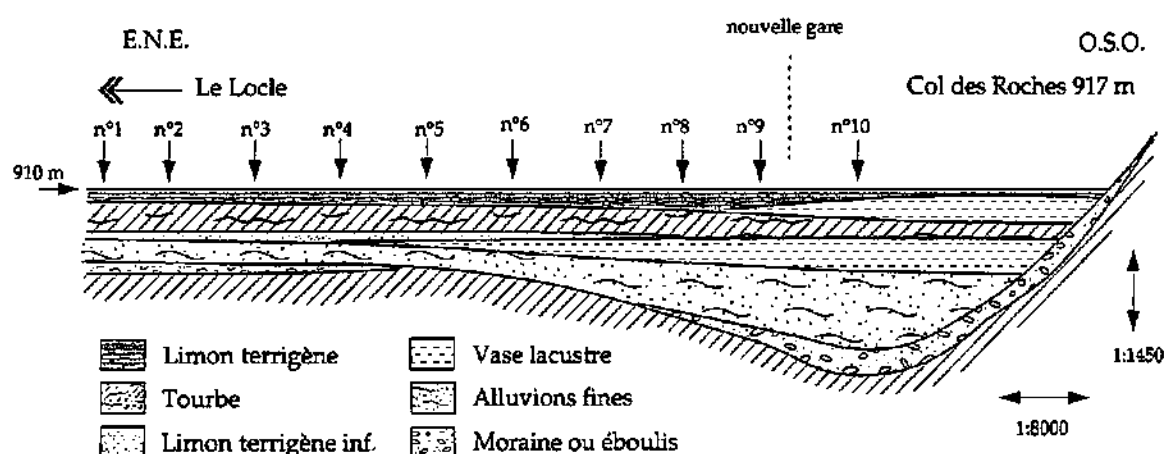


Figure 1.17 : Coupe longitudinale du Marais du Col-des-Roches reconstituée à partir des forages situés le long d'un transect ENE/WSW (Favre, 1911, non modifié)

l'actuelle gare de triage du Col-des-Roches. 18 forages ont été accomplis. L'analyse de ceux-ci est à l'origine d'une première interprétation de la répartition des corps sédimentaires établie en 1911 par Favre (figure 1.17). A côté de l'ancienne gare, le forage n° 10 a atteint 28,50 mètres sans toucher le substrat rocheux (Schardt, 1905).

1.2. LES FORAGES RÉCENTS

1.2.1. Le choix de l'emplacement des forages

1.2.1.1. Le site du Locle

Les points de forage du Locle ont été implantés à partir des travaux anciens de Favre (1911), de données géotechniques récentes (De Cernville, 1981), et en fonction de l'emplacement des constructions, du réseau de voiries et de l'accessibilité aux parcelles. Malheureusement, et pour cette dernière raison, aucun forage n'a pu être réalisé dans le centre du Marais (figure 1.18). Les descriptions lithologiques des forages se trouvent dans les annexes 3 et 4.

- LLC 1 : 47°03'03", lat. N ; 6°43'35" long. E.

- LLC 2 : 47°03'15", lat. N ; 6°44'56" long. E.



Figure 1.18 : Localisation des points de forage du Marais du Col-des-Roches

1.2.1.2. Le site d'Ilay

Le point de forage du lac d'Ilay (46°37'15" lat. N ; 5°53'50" lg E) a été choisi pour l'intérêt scientifique de sa séquence sédimentaire ; ce site ayant déjà fait l'objet de nombreuses analyses (Magny, 1991 a et b, Magny *et al.*, 1995) (figure 1.19).

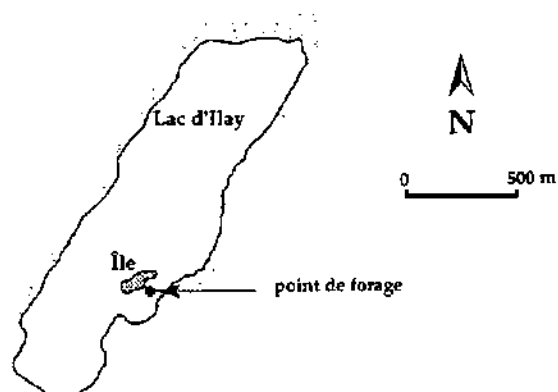


Figure 1.19 : Localisation du point de forage du lac d'Ilay

1.2.2. Les moyens techniques

Au Locle, la réalisation des forages récents a nécessité la mise en oeuvre de matériel de forage lourd. Plusieurs jours, répartis au cours des années 1992 et 1993, ont été nécessaires à la réalisation de six forages dans ce Marais. La première mission a été effectuée par P. Guenet du Laboratoire de Botanique historique et de Palynologie de l'Université d'Aix-Marseille avec la foreuse acquise par ce laboratoire. Un carottier à piston (1) (figure 1.20) a été employé pour le prélèvement des sédiments meubles de la partie supérieure du remplissage. Un carottier à câble (2) a été utilisé pour prélever les sédiments beaucoup plus compacts et chargés en sable et graviers à plus grande profondeur.

Le carottier à piston a été utilisé pour le forage LLC 1 de 0 à 20.58 m et de 0 à 12.05 m pour le forage LLC 2. Le carottier à câble a servi de 20.58 à 40.82 m pour le forage LLC 1 et de 12.5 à 15.30 m pour LLC 2. Malheureusement, ces techniques de forage présentent des inconvénients dans les sédiments particuliers sur le site : avec le carottier à piston le matériel est compacté ; avec le carottier à câble certains sédiments ne sont pas prélevés du fait de leur texture rendue encore plus fluente par l'injection d'un fluide de forage (*Premix 550*) ou par l'eau des nappes phréatiques dans le cas du forage LLC 1.

A titre d'exemple, le prélèvement au carottier à piston a fourni, pour le forage LLC 1, une séquence de 14.04 m de sédiments analysables au lieu de 20.58 m ! Pour la tranche 20.58 m / 40.82 m, il manque 9.54 m de sédiments par le biais de l'utilisation du carottier à câble. Il devenait dès lors impératif de renouveler ces forages compte tenu des objectifs et de la stratégie d'échantillonnage envisagés au départ.

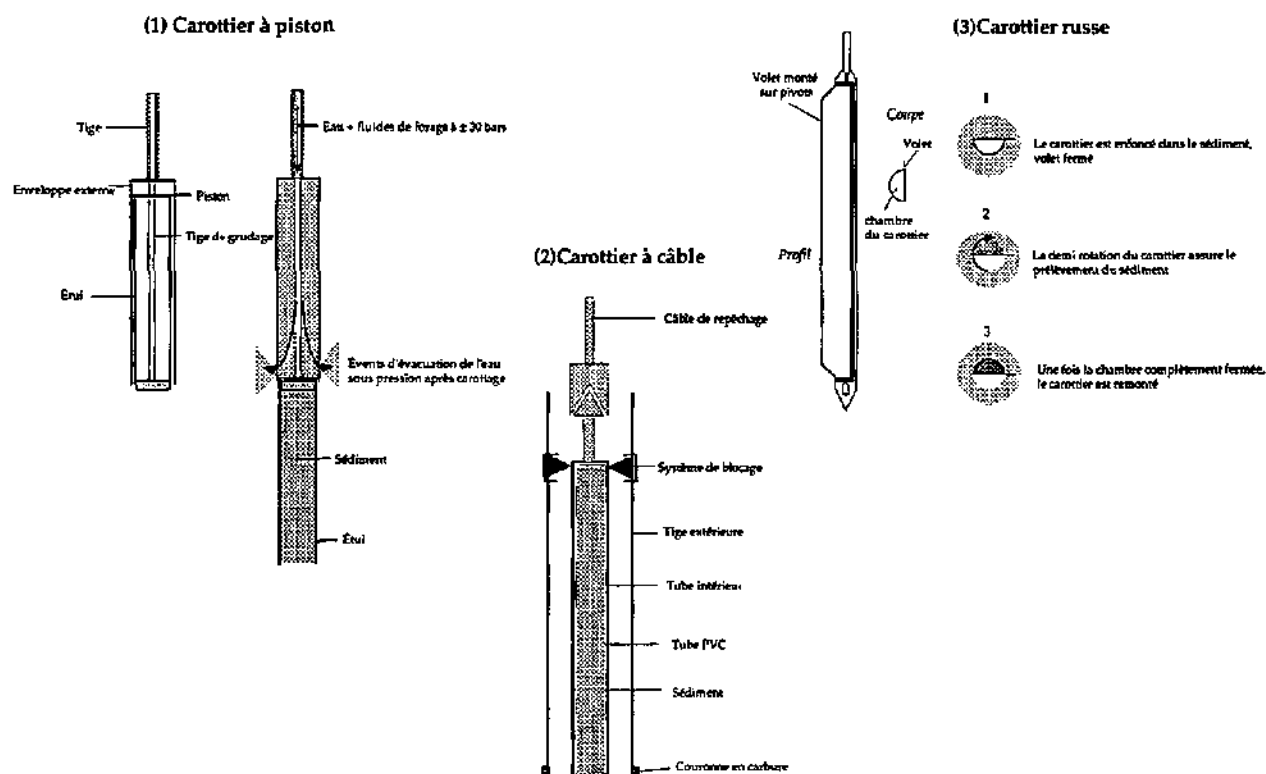


Figure 1.20 : Schémas simplifiés des différents types de carottiers et de leurs principes de prélèvement.

(1) Le piston est un carottier dont le principe de fonctionnement repose sur une vitesse rapide de coupage du sédiment. Ce type d'outil est classé dans les carottiers dits "à parois minces" ; il est destiné au prélèvement des sédiments à faible cohésion, de l'ordre de 0.01 millipascal (mPa) à 0.3 mPa. Il a une vitesse de prélèvement voisine de 30 cm/s.

(2) Le carottier à câble fonctionne en pression-rotation. Cet outil se présente sous la forme d'un carottier double comportant un tube intérieur muni d'une trousse coupante dépassante et rétractable par rapport à la couronne de découpage qui est située sur l'enveloppe extérieure. Ce carottier "à câble" est équipé d'un système de repêchage rapide qui accélère la remontée des trains de tige avant d'accéder au tube intérieur. Ce type de matériel fonctionne avec l'ajout de fluides de forage qui permettent d'une part de réduire le coefficient de paroi en limitant le frottement du sédiment sur l'extérieur du carottier, et de remonter d'autre part les "cuttings" qui, faute d'être évacués, pourraient bloquer la remontée du carottier.

(3) Le carottier russe, type GYK, est constitué d'une chambre demi-cylindrique muni d'un volet central fixé sur pivots. La pénétration du carottier (1), volet fermé, jusqu'à la profondeur désirée est assurée par pression ; une rotation de 180° découpe ensuite un demi-cylindre de sédiment (2 et 3). C'est ce mode de prélèvement qui fournit les meilleurs résultats en évitant la compaction du sédiment et en ne perturbant pas sa position stratigraphique. Cependant cet équipement ne peut pas être utilisé manuellement au delà d'une profondeur de 10 m.

C'est pourquoi une sondeuse mécanique APAGEO équipée de tarières et de deux carottiers russes (l'un de 50 cm, l'autre de 1 m) adaptés aux caractéristiques de la machine, a été employée pour les forages LLC1-2, LLC1-3, LLC1-4, LLC1-5 et LLC 1-6 distant de moins de 1 m du forage LLC 1. Quatre campagnes différentes ont été nécessaires pour perfectionner l'adaptation du matériel afin d'obtenir un forage continu. La défaillance d'une pièce maîtresse du système n'a pas permis de poursuivre le forage LLC1-6 au delà de 13 m de profondeur.

Sur le site d'Ilay, le forage a été réalisé manuellement avec un carottier russe de type GYK de 0.5 m de longueur sous une tranche d'eau de 1.50 m environ.

1.3. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Elles ont été employées pour reconnaître la topographie du fond du bassin lacustre et caractériser les variations d'épaisseur du remplissage sédimentaire. En raison de problèmes législatifs locaux liés à l'utilisation des explosifs, l'étude sismique profonde n'a pas pu être réalisée par le laboratoire de Besançon. Seules les méthodes électriques ont été utilisées pour la prospection du Marais du Locle.

Ces méthodes permettent de mieux comprendre la structure du sous-sol grâce à l'étude des résistivités électriques des formations qui le composent.

1.3.1. La résistivité électrique

Cette propriété caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire le courant électrique ou, à l'inverse, sa résistance. Cette propriété est utilisée ici pour caractériser les variations horizontales et verticales qui affectent le remplissage sédimentaire et le substrat dans l'emprise du bassin de réception. Cette propriété physique est liée à la cohésion et à la

porosité des matériaux du sous-sol. L'état d'hydratation ainsi que la quantité de sels dissous (électrolytes) sont les acteurs des transferts de charges de la conductibilité de ces matériaux. Les dispositifs de mesure de cette propriété peuvent être variés, mais deux modes d'investigation du sous-sol sont préférentiellement utilisés : le traîné et le sondage électrique.

Dans le cas du traîné on s'intéresse une tranche du sous-sol d'épaisseur à peu près constante déterminée par la dimension, en surface, du dispositif de mesure. Ce mode d'investigation est surtout sensible aux variations latérales de la résistivité électrique que l'on peut cartographier par l'exécution de plusieurs traînés.

Le sondage électrique porte sur l'étude des variations verticales de la résistivité. Il apporte des informations quantitatives à la verticale du point de mesure. Il est possible de déterminer l'épaisseur et la résistivité des couches à l'aplomb du point de sondage.

1.3.2. Le sondage électrique

Le sondage électrique (figure 1.21) consiste à mesurer successivement la résistivité électrique du sous-sol ($\rho = \Delta V/I$) à des profondeurs d'investigation croissantes, proportionnelles aux dimensions en surface du dispositif quadripolaire de mesure (I intensité du courant injecté par deux électrodes A et B, ΔV la différence de potentiel qui apparaît entre les 2 autres M et N, et K , coefficient géométrique déterminé par la position des électrodes les unes par rapport aux autres ; en configuration Schlumberger, elles sont en ligne et symétriques par rapport au centre du dispositif avec $MN \ll AB$). La courbe du sondage (figure 1.21) représente, selon une échelle bi-logarithmique, l'évolution de la résistivité avec la profondeur en fonction de la demi-longueur $AB/2$ du quadripôle. L'interprétation aboutit à l'établissement d'un modèle quantitatif de la distribution des résistivités de plusieurs couches successives de terrain dont on détermine précisément l'épaisseur et la profondeur. 37 sondages électriques ont été réalisés sur un réseau maillé couvrant de manière homogène toute la superficie prospectable du marais, soit 15 ha environ.

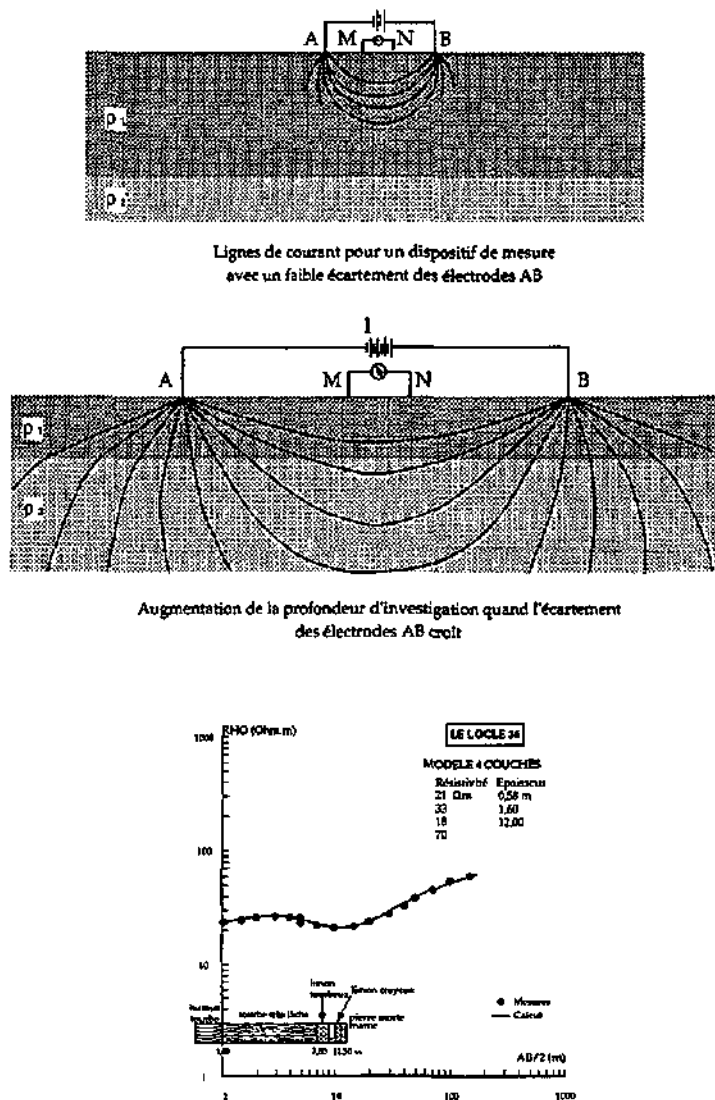


Figure 1.21 : Technique du sondage électrique, dispositif Schlumberger (d'après : Meyer De Stadelhofen, 1991 ; Bossuet et al., 1993)

2. REPRÉSENTATIVITÉ ET STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

La stratégie d'échantillonnage couramment adoptée pour des études palynologiques, sédimentologiques et géochimiques intéressant un bassin peu connu est celle qui consiste, dans un premier temps, à analyser une colonne sédimentaire dans son intégralité avec un pas d'échantillonnage régulier (tous les 5 à 10 voire 15 cm au Locle). Ensuite, le pas de prélèvement est resserré aux endroits où l'on observe de brusques changements de faciès (tous les centimètres ou les demi-centimètres).

Cette stratégie imposait de mesurer des descripteurs nombreux pour fournir aux sondages une base de travail dans les différentes disciplines (pour le Marais en particulier). À l'opposé, l'échantillonnage a été dense et systématique sur les sédiments des carottes du lac d'Ilay compte tenu des travaux déjà disponibles (tous les deux centimètres).

3. CHOIX DES TYPES D'ANALYSES ET PRÉPARATION DU MATÉRIEL

Au départ, étaient prévues des analyses granulométriques, minéralogiques et géochimiques. Mais il fallait, avant tout, fixer le cadre paléoenvironnemental et climatique pour pouvoir, dans un second temps, concentrer les efforts sur des périodes choisies (Dryas récent et Petit Age Glaciaire) compte tenu de la durée du projet limitée à trois années. L'étude palynologique a donc été mise en oeuvre prioritairement. Les différentes étapes de la chaîne opératoire sont reportées sur la figure 1.22.

3.1. LA PALYNOLOGIE

3.1.1. la méthode

Les sédiments lacustres contiennent un grand nombre de spores et de pollens. Toutes les espèces végétales produisent des quantités souvent considérables de spores et de pollens qui sont généralement véhiculés par les courants atmosphériques, par les insectes ou par l'eau. Ce sont des éléments dont la taille est comprise entre 2,5 et 200 μm (Pons, 1970 ; Richard, 1988) et à paroi est très résistante leur garantissant une bonne conservation. D'innombrables caractères de la paroi peuvent former des combinaisons infinies et permettent, lors de l'observation d'un pollen ou d'une spore, de déterminer l'identité de la plante l'ayant produit. Les caractères spécifiques observés sont : la forme et la taille du grain, la structure de la paroi, le nombre et la répartition des surfaces spécialisées de la paroi.

Le dénombrement de ces éléments (spores et pollens) permet de retracer l'évolution de la végétation dans une région donnée et de proposer par la suite une interprétation en termes de climat par comparaison avec les données des régions limitrophes.

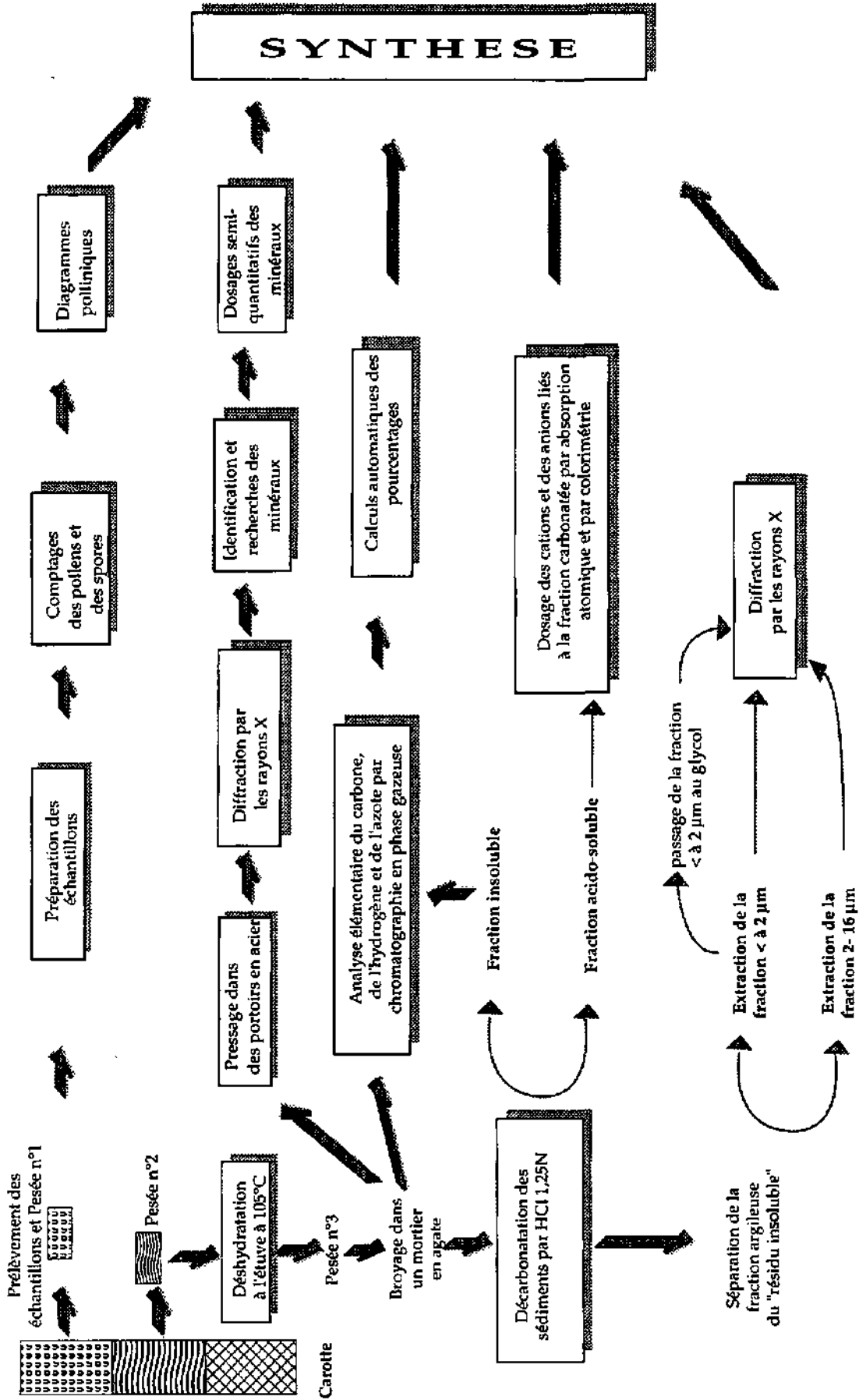


Figure 1.22 : La chaîne opératoire.

3.1.2. Les techniques

3.1.2.1. Extraction et préparation des échantillons

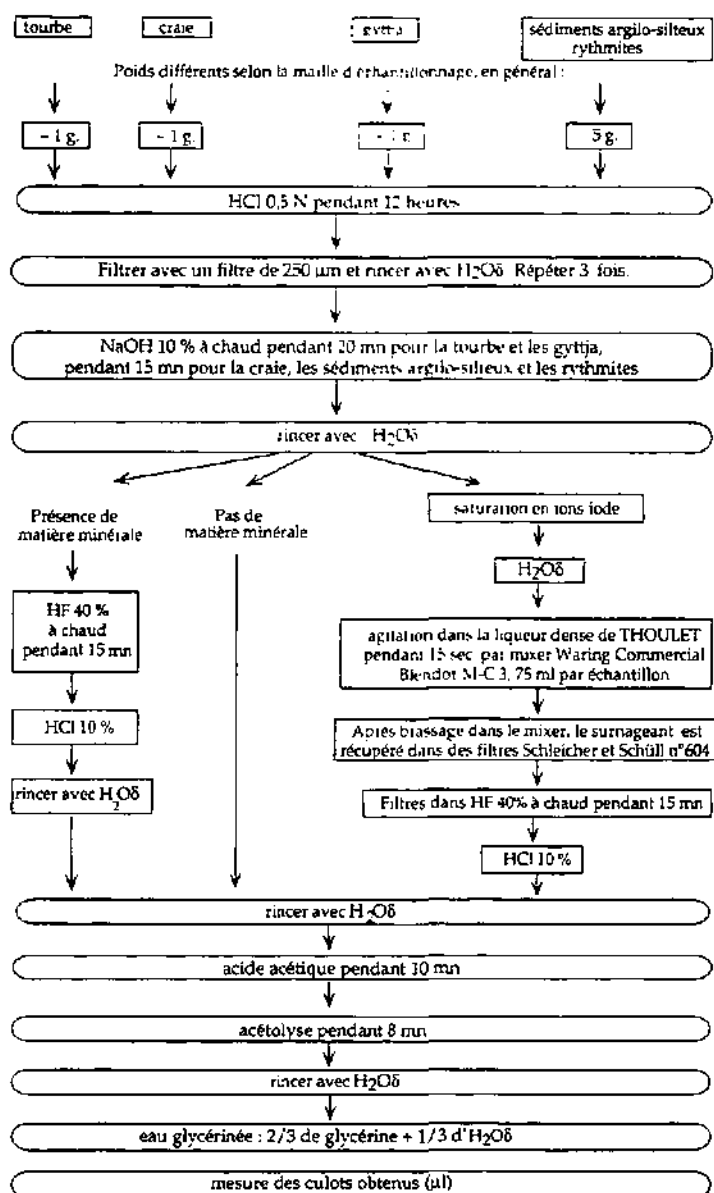
Il s'agit d'éliminer par dissolution chimique la totalité de la gangue minérale et les restes végétaux non polliniques pour concentrer les spores et les pollens (figure 1.23). La richesse potentielle des sédiments détermine la méthode de préparation chimique. Pour les sédiments riches en pollens (les tourbes, les craies et les limons organiques), on utilise la méthode dite NaOH et, pour les autres, (sédiments argileux, sableux ou argilo-sableux) la méthode de Thoulet (méthode simplifiée par Bastin et Coûteaux, 1966) qui permet de concentrer les rares pollens présents. Les pollens et les spores sont conservés dans une solution d'eau glycinée à 30 % et sont prêts pour l'observation microscopique.

La méthode volumétrique décrite et utilisée par de nombreux auteurs (Cour, 1974 ; Clerc, 1988 ; Ruffaldi, 1993) a été mise en oeuvre pour l'établissement des concentrations absolues des pollens contenus dans ces sédiments (nombre de pollens et de spores par gramme de sédiment). Tous les échantillons ont été traités dans cette optique.

3.1.2.2. La détermination des pollens

La détermination des pollens et des spores s'est faite à l'aide de microscopes photoniques binoculaires Leitz Dialux 22 et Laborlux D. Le grossissement utilisé était de 312,5 (objectif x 25 ; oculaires x 12,5), voire de 500 (objectif x 40 ;

Figure 1.23 : Méthodes de préparation des échantillons pour chaque type de sédiment (d'après Bastin et Coûteaux, 1966)



Entre chaque phase, une centrifugation de 3000 trs/min est effectuée pendant 5 mn. Après passage dans la liqueur dense de Thoulet, la centrifugation est montée à 4000 trs/min pendant 15 mn.

L'acétolyse se réalise avec 9 parties d'anhydride acétique et 1 partie d'acide sulfurique, en comptant 20 cm³ par échantillon. La solution de Thoulet est préparée avec 732 gr. de iodure de Cadmium, 664 gr. de Iodure de Potassium et 604 ml d'H₂O₆, sa densité est de 2,1.

La solution peut être utilisée plusieurs fois après passage dans les filtres Schleicher et Schüll n°589 en prenant soin de ramener sa densité à 2,1 par ébullition après chaque manipulation.

oculaires x 12,5) ou 1250 (objectif x 100 à immersion ; oculaires x 12,5) lorsque cela s'avérait nécessaire. De 300 à 900 pollens ont été dénombrés par échantillon.

Le recours à la collection de référence a été indispensable tout au long de cette recherche. Parallèlement, divers ouvrages ont été consultés : Faegri et Iversen (1989), Erdtman (1969) ; Travers *et al.*, (1976) ; Punt *et al.*, (1976) ; Hedberg (1946), Moe (1974), Stone et Broome (1975) ; Reille (1990, 1992), ainsi que les reproductions microphotographiques jointes à de nombreuses publications.

Malgré tout, un certain nombre de grains de pollens n'ont pas pu être déterminés en raison de leur mauvaise conservation ou de l'incertitude quant à leur appartenance à tel ou tel taxon (le terme taxon couvre ici les notions d'espèce, de genre ou de famille) ; ils ont été systématiquement dénombrés et regroupés, dans les diagrammes, sous la rubrique "indéterminés".

3.1.2.3. La construction des diagrammes polliniques

Les logiciels DIAM et SCOPOLI ont été conçus et développés par le Laboratoire de Chrono-Écologie pour faciliter les phases de comptage et d'élaboration des diagrammes qui constituaient une part importante du travail du palynologue. Ces logiciels sont implantés sur un matériel Macintosh doté d'un système de gestion de base de données (4^{ème} dimension ACI©). Scopoli permet d'enregistrer les comptages polliniques dans cette base de données au moment de leur lecture au microscope. La saisie se fait par l'intermédiaire d'une table à digitaliser simulant l'ex-feuille de comptage en papier et le crayon (Greffier, Richard, Ruffaldi, 1992).

Le logiciel DIAM utilise les comptages enregistrés dans la base pour produire sur l'écran du micro-ordinateur un diagramme pollinique relatif via une imprimante. La présentation reste classique avec les pollens arboréens (A.P.) comptabilisant arbres et arbustes classés à gauche du diagramme ; les pollens non arboréens (N.A.P.) étant classés à droite.

L'ordonnancement tient compte des indications écologiques des taxons par rapport au milieu (humidité et luminosité...). Les travaux de Gaillard (1984) et de Ruffaldi (1993) ont servi de référence pour déterminer les groupes suivants : les héliophiles strictes, les héliophiles, les herbacées à écologie variable, les herbacées liées à l'activité humaine, les hygrophiles et les aquatiques.

Le diagramme central représente le rapport A.P./N.A.P., avec à gauche la contribution de *Pinus* (le pin) dans ce rapport, à droite celles des *Poaceae* (les poacées), des *Cyperaceae* (les cypéracées, laîches) et d'*Artemisia* (armoise). Les spores, exprimées en nombres, sont exclues des comptages car leurs fortes représentations peuvent parfois écraser les valeurs des autres taxons, elles sont représentées à l'extrémité droite des diagrammes. À l'extrémité gauche des diagrammes, la lithologie des faciès avec la profondeur sont représentées schématiquement à partir des symboles utilisés par Troels-Smith (1955).

Les diagrammes polliniques en concentrations absolues sont représentés sous forme d'histogrammes. Les calculs sont faits automatiquement par le logiciel Diam. Par contre la représentation reste partiellement manuelle. La stratigraphie et la position des échantillons y figurent à gauche. Ensuite, sont dessinés les profils des taxons arboréens et herbacés susceptibles de fournir des éléments nouveaux pour l'interprétation. À droite, est reportée la zonation du diagramme relatif.

Les concentrations absolues issues de la méthode volumétrique donnent le nombre de pollens par gramme de sédiment. Pennington et Sackin (1975) ont notamment démontré l'intérêt de leurs calculs pour l'interprétation des diagrammes tardiglaciaires.

3.1.2.4. justification des zones polliniques locales

La représentation du diagramme pollinique conduit dans un premier temps à délimiter les *zones polliniques locales*. Elles correspondent à des ensembles au contenu en spores et en pollens homogène et différent de celui des zones situées immédiatement au dessus et au dessous (Birks, 1973 ; Welten, 1982 ; Wegmüller, 1966 et 1977). Certains auteurs parlent également de biozones (Ammann, 1989 ; Hadorn, 1992, 1994).

Le recours à l'outil mathématique (Beaulieu de, Goeury 1987; Goeury, 1988) peut également être utilisé pour délimiter plus objectivement ces zones polliniques dont la zonation ne doit pas tenir compte des facteurs chronologiques, climatiques et stratigraphiques.

3.1.2.5. Les zones polliniques locales et la chronologie

Pour pouvoir intégrer les données acquises ici dans un cadre plus régional, il est fait référence aux travaux antérieurs effectués dans des sites limitrophes. Les zones polliniques sont, soit comparées aux apparitions des principaux taxons tardiglaciaires et holocènes choisis comme indicateurs, soit comparées à d'autres événements particuliers signalés dans la littérature.

Souvent, plusieurs zones polliniques locales peuvent être regroupées dans des unités plus importantes. Ces unités, appelées biozones, sont celles décrites par Firbas (1949 et 1954) complétées par des dates radiocarbone (Mangerud et al., 1974 et 1978) constituent des chronozones. Cette chronozone est encore très largement utilisée (figure 1.24). Le Tardiglaciaire y apparaît subdivisé en 2 phases froides, Dryas ancien et Dryas récent

Figure 1.24 : Zonation du Tardiglaciaire et de l'Holocène

Firbas, 1949, 1954 Mangerud et al., 1974, 1978		ALPES Beaulieu et al., 1994	JURA Beaulieu et al., 1994	SUISSE Welten, 1982 Ammann, 1989 Loutch et al., 1992	
Dates	Zones				
	X				
	Subatlantique				
	IX				
2700		2700	2700	2500	2500
	Subboréal				
	VIII				
4500		4700	4700	5000	4450
	Atlantique				
	VII				
	VI				
7500		8000	8000	8000	8000
	Boréal				
	V				
9000		9000	9000	9000	
	Préboréal				9500
	IV				
10 000		10 200	10 000	10 000	10 000
	Dryas récent				
	III				
11 000		10 800	11 000	11 000	10 800
	Allerød				
	II				
11 800		11 900?	11 900?	12 000	12 000
	Dryas ancien supérieur				
	Ic				
12 400					
	Bølling				
	Ib				
13 300		13 300	13 300	13 000	12 700
	Dryas ancien				
	Ia				

interrompues par une phase de réchauffement, l'interstade tardiglaciaire Bølling-Allerød. Il est à noter que l'existence d'un Dryas ancien supérieur marquant une discontinuité dans l'interstade Bølling-Allerød est très controversée. L'Holocène est partagé en 7 chronozones allant du Préboréal (IV) au Subatlantique ancien et récent (respectivement IX et X).

Les limites des chronozones sont précisées par des datations radiocarbone, elles mêmes discutées par comparaison avec celles citées dans les régions limitrophes (Beaulieu *et al.*, 1994).

3.2. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS POUR LA MINÉRALOGIE ET LA GÉOCHIMIE

L'échantillon de sédiment est prélevé à la seringue, afin d'en connaître le volume. Il est ensuite pesé puis déshydraté à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures (figure 1.22). Il est de nouveau pesé pour en calculer, après dessiccation, sa teneur en eau (Manger, 1963).

Le calcul de la teneur en eau (Kübler, 1984 ; Kübler, Schwalb, 1988 ; Schwalb, 1992) ou celui de l'humidité massique (Chamayou, Legros, 1989) est :

$$\text{Teneur eau (\%)} = \frac{(\text{Masse de sédiment humide} - \text{Masse de sédiment sec})}{\text{Masse de sédiment humide}} \times 100$$

Le calcul de la porosité (Kübler, Schwalb, 1988 ; Schwalb, 1992) ou teneur en eau volumique (Manger, 1963 ; Chamayou, Legros, 1989) correspond au pourcentage d'eau exprimé en volume d'eau par rapport au volume de sédiment sec. La porosité totale est calculée à partir de la perte en eau du sédiment.

La masse volumique de l'eau étant par ailleurs :

$$\rho_{\text{eau}} = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Volume d'eau}} = 1 \quad [\text{g. cm}^{-3}]$$

Le calcul de la porosité devient :

$$\text{porosité (\%)} = \frac{(\text{Masse de sédiment humide} - \text{Masse de sédiment sec}) \times 100}{\frac{\text{Masse de sédiment humide}}{\text{Volume de sédiment prélevé}}} \times \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Volume d'eau}}$$

$$\text{Porosité (\%)} = \frac{\text{Teneur en eau (\%)}}{\text{Volume de sédiment prélevé}} \times 1$$

Les échantillons secs subissent ensuite un broyage dans un mortier en agate pendant 2 minutes. La poudre obtenue est destinée dans un premier temps à l'analyse diffractométrique. Cette analyse non destructrice permet de conserver intact le sédiment pour les analyses géochimiques.

3.3. LA MINÉRALOGIE

3.3.1. Le principe de la méthode

Les réseaux cristallins peuvent absorber, transmettre et surtout diffuser un rayonnement de nature électromagnétique comme les rayons X dont l'énergie importante et la longueur d'onde sont voisines de la dimension des atomes (soit entre 0,7 Å et 2 Å ou encore entre 0,07 nm et 0,2 nm). Ce phénomène de diffusion (ou de diffraction) des rayons X par un réseau d'atomes est régi par la loi de Bragg (Persoz, 1969 ; Bradley, Brown, 1980 ; Reynolds, Moore, 1989) et s'écrit :

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

3.3.2. Les techniques de mesure

Les rayons X sont obtenus dans un tube à vide très poussé (10^{-6} mm de mercure) par le choc d'électrons sur une anticathode de cuivre dont la nature détermine la longueur d'onde du rayonnement émis. En radiocristallographie, la radiation monochromatique de la raie la plus intense du spectre ($K\alpha$) est utilisée (Millot, 1960 ; Reynolds, Moore, 1989). L'analyse

minéralogique est faite par un diffractomètre SCINTAG XDS 2000™ dont les caractéristiques figurent dans le tableau 1.1 :

Energie :	45kV, 40 mA
Rayonnement :	CuK α , $\lambda = 1,54060$ Å
Détecteur spectral :	Cristal de germanium PS1 de Kevex (le cristal de germanium est refroidi par effet Peltier, il permet d'éliminer la raie K du Cuivre et les parasites du fer sans recourir à des filtres)
Continuous scan :	1° 2 θ / min
Fentes normales :	0.5/0.3
Chopper increment :	0.03° 2 θ
K α 2-stripping	
Fast Fourier Noise Filter	active
Background correction	automatique
Noise Threshold :	1.5
Smoothing points :	3
ESD (Estimated standard deviation) multiplier :	4.0
Sample spin :	porte objet tournant, taille moyenne 15 mm

3.3.2.1. L'analyse des poudres désorientées «Roche Totale»

Cette technique de préparation répond au fait que la surface de la poudre offre toutes les orientations qui seront donc statistiquement bien représentées. Le sédiment total (figure 1.22) séché à 105 °C est broyé 2 minutes dans un mortier en agate. La poudre obtenue est

Tableau 1.1 : Caractéristiques du diffractomètre et des paramètres analytiques utilisés.

Méthodes

tassée à 20 bars par une presse hydraulique dans un porte échantillon en acier. Ces échantillons sont soumis l'un après l'autre aux rayons X deux fois de suite, la vitesse de rotation est de $1^\circ 2\theta$ /minute entre 1 et $65^\circ 2\theta$. Les intensités brutes des pics et la position de ces derniers sont enregistrées automatiquement. Un court programme effectue une première correction sur la position des pics des minéraux ("Fast Fourier Noise") et une correction du bruit de fond.

Les corrections effectuées, les résultats (diffractogrammes) des analyses sont imprimés. Les diffractogrammes ont des dimensions fixées par le système informatique de gestion (XDS 2000), seuls des zooms sur les intensités brutes et/ou l'échelle de rotation (degré 2θ) peuvent être pratiqués. Les listes des différents pics d'un même minéral, leurs positions en degré 2θ ainsi que les valeurs des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) et en CPS (Coups Par Seconde) relevées par le compteur suivant le programme appliqué, peuvent être imprimées.

3.3.2.2. Composition minéralogique - Identification des minéraux

Pour établir l'inventaire minéralogique, il faut comparer les diffractogrammes des échantillons, soit à une série de diffractogrammes de référence dont on connaît la position et l'intensité des pics (cf. tableau 1.2), soit à des cartes de référence "JCPDS". La composition minéralogique des échantillons inconnus est déduite lorsque tous les pics ont été attribués à un minéral.

Minéral	Position en degré 2θ	Position en Angström
Calcite	29.45	3.030
Aragonite	26.22	3.396
Dolomite	30.94	2.888
Quartz	26.65	3.342
Phyllosilicates	19.90	4.460
Feldspaths potassiques	27.50	3.240
Plagioclases	27.89	3.194
Pyrite	33.03	2.709

Roche totale Pic 100 avec $\text{CuK}\alpha 1 = 1.54060 \text{ \AA}$

Tableau 1.2 : Tableau des valeurs des positions en degré 2θ et en Angström (Å) des pics 100 (Pics ayant les plus fortes intensités) des minéraux

Tableau 1.3 : Tableau des coefficients d'absorption massique des différents minéraux rencontrés utilisés dans le calcul des pourcentages (d'après Rolli, 1992)

Standard	Intensité en CPM du pic 100 (cf. Tableau 1.1)	Coefficient d'absorption massique
Phyllosilicates	200000	47
Quartz	800000	36.40762
Feldspaths potassiques	174450	50.56204
Plagioclases	333286	34.19769
Calcite	231375	74.43243
Dolomite	316840	48.93391
Aragonite	60430	74.43243
Pyrite	72273	191.1596
matrice		47

3.3.2.3. Calculs

des pourcentages

Un programme informatique : Mac Dosage (Klug, Alexander, 1974 ; Brindley, Brown, 1980 ; Ferrero, 1966 ; Persoz, 1969 ; Rolli, 1992)

permet de réaliser un dosage semi-quantitatif de la composition des sédiments analysés. Ce dosage semi-quantitatif se fonde sur le fait que les intensités des pics d'un échantillon reflètent les proportions de chaque élément du mélange. La quantification se fait donc en

comparant l'intensité d'un pic caractéristique des minéraux présents à celles d'étalons externes en tenant compte des coefficients d'absorption massique des minéraux (tableau 1.3) ; ce dosage répond à la loi :

$$I = I_0 \times C_m \times \mu_m / \mu_e$$

I_0 : intensité du minéral pur (Standard),

I : intensité du minéral à quantifier,

μ_m : coefficient d'absorption massique du minéral pur,

μ_e : coefficient d'absorption massique de l'échantillon (le minéral + sa matrice),

C_m : concentration du minéral dans l'échantillon.

3.3.2.4. L'analyse des plaques orientées

Cette technique est utilisée pour caractériser les minéraux argileux ; pour ces minéraux, ce sont les plans cristallins parallèles à la surface des feuillets qui sont presque

exclusivement représentés (001). Pour un minéral argileux donné, on détermine facilement l'épaisseur du feuillet qui correspond à la distance réticulaire de la première raie de diffraction sur le spectre de rayon X, $d(001)$; des réflexions sous multiples (harmoniques) $d(001)/2$; $d(001)/3$ etc... vont également apparaître. Un second type d'échantillon est décarbonaté pour en séparer les fractions minérales argileuses selon la méthode des plaques orientées. La séparation granulométrique utilisée ici est celle du Laboratoire de Minéralogie, Pétrographie et Géochimie de Neuchâtel mise au point par Rumley et Adatte (1983) ; Starkey *et al.*, 1984. La figure 1.25 résume l'enchaînement des différentes étapes.

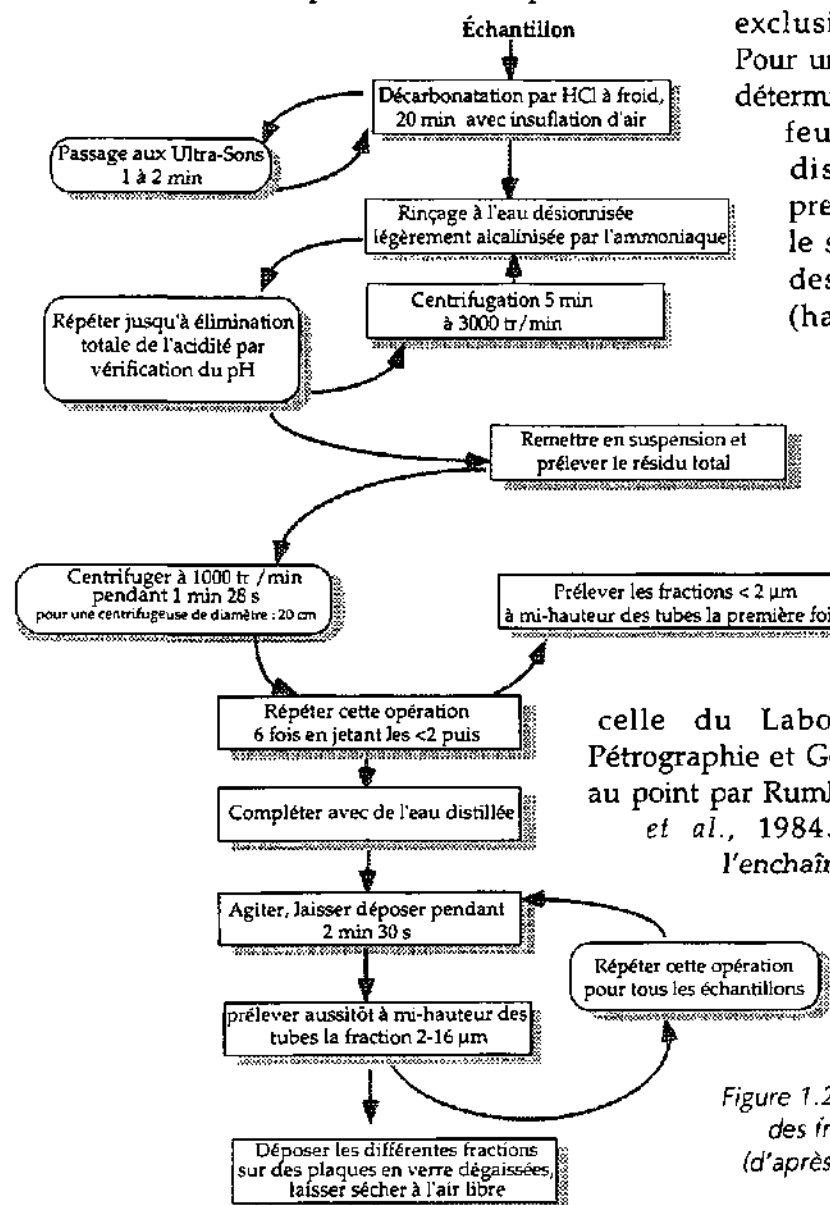


Figure 1.25 : Méthode de séparation rapide des fractions inférieures à 2 et 2-16 μm (d'après Rumley, Adatte 1983 ; Starkey *et al.*, 1984)

3.3.2.5. Séparation des fractions

Deux types de fractions sont obtenues, celles comprises entre 2 et 16 μm et celles inférieures à 2 μm .

- La fraction 2-16 μm est soumise dans un premier temps aux rayons X ; la vitesse de rotation est de $2^\circ 20'/\text{minute}$, deux passages sont effectués entre $1^\circ 20'$ et $50^\circ 20'$.

- La fraction inférieure à 2 μm , quant à elle, est soumise deux fois aux rayons X . La vitesse de rotation est la même que celle de la fraction 2-16 μm . Les deux balayages sont réalisés entre $1^\circ 20'$ et $30^\circ 20'$, l'un pour la préparation séchée à l'air et l'autre pour la préparation qui a résidé sous atmosphère d'éthylène glycol. Ce traitement remplace les molécules d'eau interfoliaires par celles du glycol ce qui entraîne un gonflement de toutes les smectites à 17 Å ; l'illite, la chlorite, la kaolinite et la vermiculite ne montrent pas de changements à ce traitement.

3.3.2.6. L'analyse des résultats

Pour chaque échantillon, les analyses fournissent trois types de diffractogrammes et de listes avec tous les pics des minéraux et leurs intensités. L'inventaire minéralogique est conduit de manière comparable à celui des poudres. En effet, la composition de la fraction phyllosilicatée est connue lorsque chaque pic est attribuable à un minéral. Dans des tableaux, sont relevées toutes les intensités brutes en Coups Par Seconde (CPS) des séries harmoniques et des minéraux en grains de la fraction inférieure à 2 μm glycolée et celles de la fraction 2-16 μm .

Généralement, l'exploitation des résultats porte sur la comparaison des profils des intensités brutes des minéraux en grains des deux fractions d'une part et sur les intensités brutes des pics 001 des séries harmoniques d'autre part. Il s'agit de M 001, CHL 001 de K 001 et enfin de IS 001 cf. tableau 1.4. Des pourcentages, dont la représentation peut amener des éléments à la discussion, peuvent être calculés. La somme des intensités brutes des différents minéraux est égale à 100 %. Ainsi, l'intensité relative des micas est calculée comme suit :

$$\text{micas (\%)} = \frac{\text{Intensité brute du pic 001 du mica}}{\sum \text{des intensités brutes des autres minéraux}} \times 100$$

Pour la fraction 2 μm , la position du pic vers 4 et $5^\circ 20'$ peut être relevée alors que les positions moyennes des "plateaux" vers $10^\circ 20'$ et vers $15^\circ 20'$ sont significatives. Ces positions sont obtenues par "Profile Fitting" ou encore par "déconvolution" ; cette opération consiste à décomposer un pic complexe en plusieurs pics élémentaires selon la fonction 7 de Pearson. Ces calculs permettent d'apprécier le pourcentage d'illite dans les interstratifiés du type illite-smectites (IS). Reynolds, Moore (1989) propose un mode de calcul de ce pourcentage qui est basé sur la position des pics 002 et 003 de ces interstratifiés :

$$\% \text{ de smectite} = (4.7198605006 \times \Delta^2 - 91.843364241 \times \Delta + 449.63133345)$$

$$\Delta = \text{position du pic 003}^* - \text{position du pic 002}^* \text{ Interstratifiés Illite-Smectite}$$

La diffraction par les rayons X de la fraction argileuse est également un moyen physique d'estimer la composition chimique des micas (Rey, Kübler, 1983) et des chlorites (Oinuma *et al.*, 1972) à partir des analyses de ces séries harmoniques des plaques orientées. Les valeurs des intensités brutes sont reportées dans des diagrammes ternaires. Par comparaison avec des plages caractéristiques de compositions chimiques connues, il est possible de déterminer la tendance muscovite-illite-phengites des micas de séries sédimentaires au cours de la diagenèse ou alors la tendance ferro-magnésienne des chlorites. Les pics retenus sont les pics 001, 002, 005 des micas et les pics 001, 002, 003 des chlorites.

Minéral	Position en degré 2 θ	Position en Angström
Quartz	20.85	4.257
Pyrite	33.03	2.709
Feldspaths potassiques	27.3	3.25
Plagioclases	27.85	3.20
Paragonite	9.20	9.60
Amphibole	10.28	8.60
Mica 001=M 001	8.70	10.10
Mica 002=M 002	17.60	5.02
Mica 005=M 005	45.00	1.99
Chlorite 001=CHL 001	6.10	14.40
Chlorite 003=CHL 003	18.60	4.74
Chlorite 004=CHL 004	25	3.55
Kaolinite 001=K 001	12.20	7.10
Interstratifiés type Illite-Smectite= IS 001	vers 4/5	vers 17.45

Tableau 1.4 : Tableau rassemblant les positions en degré 2 θ et en Angström des pics des séries harmoniques des minéraux des fractions < à 2 μ m et 2-16 μ m

3.3.3. Les zones minéralogiques, définition

En géologie, l'usage n'est pas de diviser les profils obtenus en une série de sections comme c'est le cas en palynologie, discipline qui relève en réalité de la micropaléontologie. Il semble nécessaire de suivre ici la même démarche qu'en palynologie afin de délimiter le plus objectivement possible des sections qui seront ici des *zones minéralogiques* par comparaison aux zones polliniques locales. Cette zonation ne devra pas tenir compte de facteurs chronologiques, climatiques et stratigraphiques.

Une zone minéralogique est donc identifiée lorsque les valeurs d'un ou plusieurs minéraux propres à cette zone sont homogènes et ne se retrouvent pas de part et d'autre de celle-ci.

3.4. LA GÉOCHIMIE

Une première analyse géochimique peut être pratiquée sur la poudre ayant servi à la diffraction X. Quelques milligrammes seulement sont nécessaires aux dosages élémentaires du carbone total, de l'hydrogène total et de l'azote total. Une autre fraction du sédiment est décarbonatée pour effectuer les dosages des cations et anions contenus dans le matériel : c'est la spéciation des carbonates (Davaud, 1976 ; Weber, 1981 ; Beck, 1987 ; Bapst, 1987 ; Jantschick, 1991 ; Schwalb, 1992 ; Zeroual, 1995).

Les décarbonatations des échantillons se font avec de l'acide chlorhydrique de normalité 1,25 pendant 30 minutes à 80°C sous agitation mécanique vive. La réaction terminée, le mélange est passé sur un filtre (de type HVLP 0,45 µm préalablement étuvé) muni d'un système d'aspiration. Deux fractions sont obtenues (cf. figure 1.22, page 62). L'une acido-soluble est récupérée dans une fiole jaugée et ajustée exactement à 100 ml. La fraction non soluble, soigneusement rincée à l'eau distillée, appelée résidu insoluble (RI) est pesée après un passage à l'étuve à 110°C pendant 24 heures.

3.4.1. Les analyses élémentaires C. H. N.

3.4.1.1. Le principe

Le principe de ces dosages repose sur l'aptitude plus ou moins grande d'un gaz à être transporté rapidement (vitesse d'élution) par un gaz transporteur inerte. C'est une chromatographie en phase gazeuse. La vitesse de propagation d'un gaz est fonction du poids et de la taille moléculaire (Giovannini *et al.*, 1975 ; Froelich, 1980 ; Watson *et al.*, 1982 ; Verardo *et al.*, 1990).

3.4.1.2. La technique de mesure

L'appareil utilisé pour effectuer les analyses élémentaires C. H. N. est du type Carlo-Erba Element n°8 Analyser géré par micro-ordinateur comparable à celui utilisé par Guppy *et al.*, (1978). L'échantillon, réduit sous forme de poudre, est introduit dans une nacelle en étain, laquelle est calcinée à très haute température (1050°C) en présence d'oxygène. Les gaz issus de cette incinération sont véhiculés par de l'hélium à travers deux colonnes ayant des fonctions oxydo-réductrices. Les gaz à analyser ont des vitesses d'élution différentes. L'azote est le premier à être détecté, suivi du carbone, puis de l'hydrogène. Au niveau du détecteur, les signaux chimiques sont transformés en signaux électriques (par un transducteur) exprimés en millivolts. Ces mesures sont comparées à celles d'un standard, l'unité informatique calcule et enregistre les pourcentages des éléments mesurés.

Le standard utilisé est le Cyclohexanone-2,4-dinitrophényl Hydrazone ayant pour formule brute $C_{12}H_{14}N_4O_4$. La teneur en C, H, N est donnée par un facteur de calibration K donné par l'analyse du standard.

$$K = \frac{T(\%) \times \text{Constante}}{A. P.}$$

T (%) : pourcentage théorique de l'élément C, H ou N dans le standard.

A.P. : aire du pic de l'élément C, H ou N.

Le pourcentage de l'élément C, H ou N est donné par la formule :

$$E (\%) = \frac{K \times A. E.}{\text{Constante}}$$

E (%) : pourcentage de l'élément C, H ou N.

A. E. : aire du pic de l'élément C, H ou N dans l'essai.

3.4.2. L'absorption atomique : le dosage des cations $\text{Fe}^{2+/3+}$, Mg^{2+} , $\text{Mn}^{4+/2+}$, K^+ , Na^+ , Sr^{2+}

3.4.2.1. Le principe

Le principe de l'absorption atomique (Ward *et al.*, 1969 ; Aruscavage, Crock, 1987) peut être résumé ainsi : chaque élément de la classification de Mendeleiev a un nombre propre d'électrons associés à son noyau. La configuration normale de ces électrons est un état stable sur les différentes orbitales. Si on applique une énergie importante sur un atome, il rentre dans un état instable ou état d'excitation. L'atome retourne rapidement à un état plus stable en rendant l'énergie absorbée sous forme de lumière ; la quantité et la qualité de l'énergie rendue sont en relation avec l'élément concerné et sa concentration. L'énergie d'excitation peut être produite par la flamme d'un mélange d'air et d'acétylène, par un arc électrique produit par un champ magnétique intense (four graphite) ou encore par le chauffage de cellules de quartz (Robinson, 1966 ; Welz, 1976 ; Aruscavage, Crock, 1987 ; Beck, 1987).

3.4.2.2. La technique de mesure

L'échantillon est vaporisé dans une flamme produite par un mélange d'air et d'acétylène. Cette énergie thermique est le moteur déclenchant la dissociation moléculaire, c'est-à-dire la production des atomes libres (gaz), lesquels retournent spontanément à l'état initial en émettant un rayonnement électromagnétique spécifique et proportionnel à la quantité de l'élément contenu dans l'échantillon (tableau 1.5). Cette quantité de lumière est détectée par l'appareil. Ces atomes à l'état libre sont capables d'absorber des radiations spécifiques produites par une lampe.

Elément	Longueur d'onde (nm)	Flamme	Seuil de sensibilité (mg/l)	Limite de détection (mg/l)
Ca^{2+}	422,7	Air+Acétylène	0,09	0,002
$\text{Fe}^{2+ / 3+}$	248,3	Air+Acétylène	0,1	0,004
Mg^{2+}	285,2	Air+Acétylène	0,008	0,0001
Mn^{4+}	279,5	Air+Acétylène	0,05	0,002
K^+	766,5	Air+Acétylène	-	0,0002
Na^+	589,0	Air+Acétylène	-	-
Sr^{4+}	460,7	Air+Acétylène	-	-

Tableau 1.5 : Tableau des paramètres analytiques tirés de Perkin Elmer User's Guide

L'appareil utilisé est un spectrophotomètre d'absorption atomique (*Atomic Absorption Spectrophotometer* ou *AAS 5100 PC de PERKIN ELMER™*). Le système est équipé d'une source lumineuse (de type H.C.L. *Hollow Cathode Lamp*) émettant une radiation spécifique de l'élément à doser. Le faisceau émis par cette lampe est divisé en deux rayons dont l'un traversera les atomes à l'état instable et y sera absorbé. L'autre rayon est dévié et servira de référence à l'appareil lors de la détection. Dans ce système de double faisceau, la mesure représente le rapport entre l'intensité de la lumière transmise à travers les échantillons et l'intensité du faisceau de référence (figure 1.26).

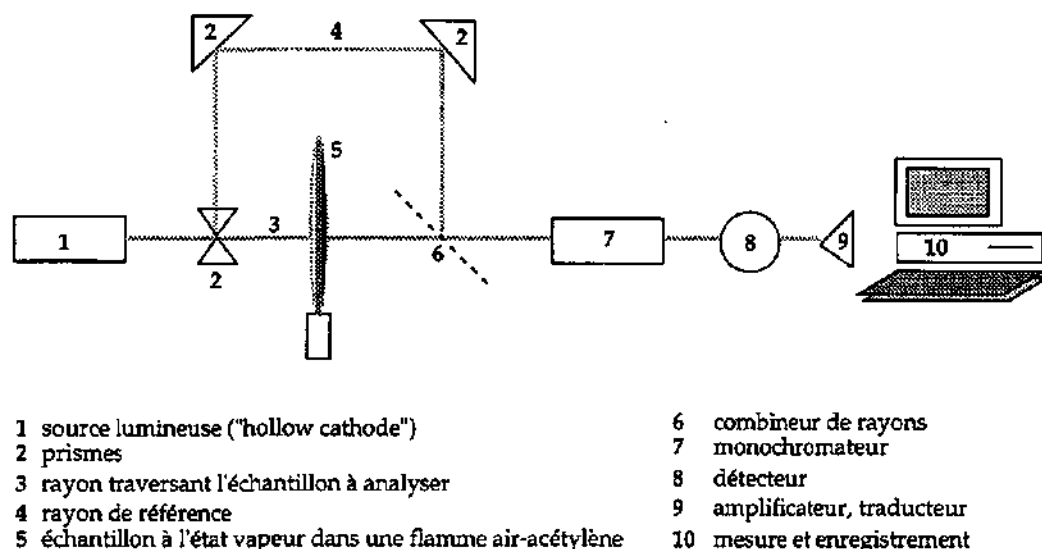


Figure 1.26 : Schéma du fonctionnement du spectrophotomètre d'absorption atomique de type Perkin Elmer™ muni d'un double faisceau

3.4.3. La colorimétrie : le dosage des éléments SiO₂, PO₄, Al

3.4.3.1. Le principe de la colorimétrie

Tout élément en solution est capable d'absorber et de transmettre une certaine quantité du rayonnement qui le traverse. La mesure de la quantité de lumière transmise par rapport à la quantité initiale est proportionnelle à la quantité de l'élément en solution (figure 1.27). La loi de Beer-Lambert décrite par Baedeker (1987) régit ce principe de l'absorbance qui rentre en application en colorimétrie.

$$A = \epsilon \times L \times C$$

A : représente l'absorbance (logarithme naturel de l'inverse de la transmission),

ϵ : coefficient d'absorption massique spécifique de l'élément,

L : longueur de substance traversée,

C : concentration de l'élément.

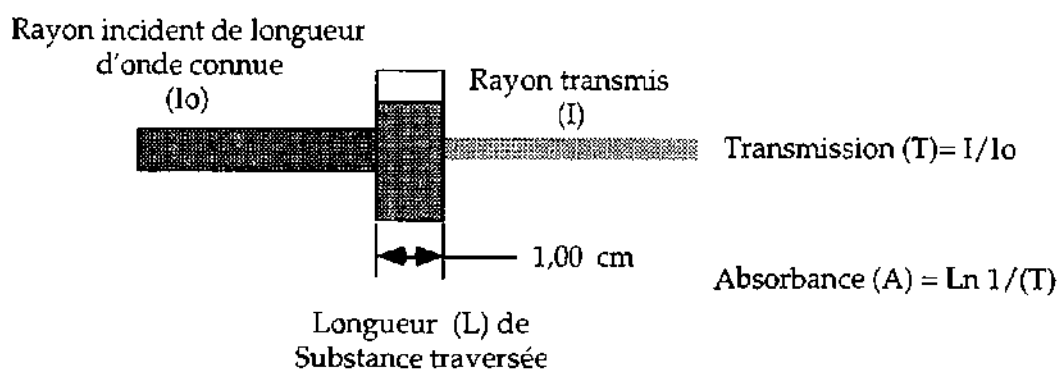


Figure 1.27 : Schéma théorique du principe des dosages en colorimétrie

- a) La méthode de dosage de la silice (SiO_2)

Elle est basée sur le principe suivant : l'heptamolybdate d'ammonium, à pH = 1.2, réagit avec la silice, mais aussi avec tous les phosphates pour donner des hétéropolyacides. L'acide oxalique additionné contribue à la destruction de l'acide molybdophosphorique (hétéropolyacide) sans toucher à l'acide molybdosilicique. Une couleur jaune de départ est réduite par le chlorure d'étain donnant un complexe bleu, proportionnel à la concentration en silice, dosable par colorimétrie à 695 nm.

- b) La méthode de dosage des orthophosphates (PO_4)

Son principe de base est le suivant : l'heptamolybdate d'ammonium réagit avec les orthophosphates pour former de l'acide molybdophosphorique. Dans un second temps, cet acide est réduit en phosphomolybdenum de couleur bleue par le chlorure d'étain en milieu acide. L'intensité du composé bleu est proportionnelle à la concentration en orthophosphates. Le composé bleu est dosable par colorimétrie à 690 nm.

- c) La méthode de dosage de l'aluminium (Al)

Le principe de sa méthode est le suivant : l'aluminium en présence de pyrocathécol violet en milieu alcalin, forme un complexe dosable par colorimétrie à 590 nm.

3.4.3.2. La technique de mesure

L'appareil de dosage F.I.A. (Flow Injection Analysis Tecator™) utilisé est composé de trois parties : un "Autosampler 5017" précède un "FIAstar 5010 Analyser" lui-même suivi par un spectrophotomètre automatique "FIAstar 5023". Cette chaîne de mesure est gérée par un micro-ordinateur ; elle est capable de mesurer en série, sur 40 échantillons, un paramètre identique (ici SiO_2 , PO_4 ou Al). Une analyse dure en moyenne 55 secondes par paramètre et par échantillon. Le nombre d'injections de l'échantillon et le temps de rinçage sont des fonctions qui peuvent être programmées individuellement. Le programme de gestion de ces fonctions est également capable de surveiller la qualité des pics de densité optique en fonction du temps. Si un incident survient au cours de la lecture de la densité optique, la mesure est rejetée.

Une prise d'essai de 40 ou 200 µl d'échantillon est réalisée, puis propulsée par un liquide de composition proche de celle contenant les éléments à doser. Différents réactifs sont injectés en fonction de l'élément à doser et réagissent avec celui-ci en donnant des composés colorés dosables par colorimétrie. La quantité de lumière transmise est proportionnelle à la concentration de l'élément dosé. Une cellule spectrophotométrique analyse la quantité de lumière transmise par rapport au faisceau lumineux de référence. Elle convertit la différence entre les deux signaux lumineux en un signal électrique exprimé en millivolts, ce dernier est comparé à une courbe d'étalonnage. Chaque échantillon est mesuré deux fois, un résultat moyen est calculé puis enregistré directement par l'ordinateur.

3.4.4. La Titrimétrie : dosage du calcium (Ca^{2+})

3.4.4.1. Le principe de la méthode

L'utilisation d'une substance chimique chélatante ajoutée en excès à la substance à doser est appliquée ici : c'est la méthode du dosage indirect. En effet, l'excès de chélatant est dosé en retour par une autre substance. Par différence, la quantité de substance à doser est déduite.

3.4.4.2. La technique de mesure

L'éthylène diamine tétracétique, plus connu sous le nom d'EDTA, est le chélatant du calcium. L'excès d'EDTA est dosé par de l'acide chlorhydrique 0,1N. Ce dosage est automatisé grâce au Titromètre MetrohmTM muni d'une électrode spécifique. Cet appareil mesure en continu la différence de pH provoquée dans la solution contenant le Ca^{2+} à doser par l'ajout d'HCl 0,1M. La quantité de Ca^{2+} coïncide avec la quantité d'HCl ajoutée pour le rétablissement d'un pH neutre. L'appareil muni d'une imprimante et d'un ordinateur, restitue la quantité de calcium (en mg) pour 1 litre de solution.

3.4.5. Les analyses isotopiques $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ et $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$

Les analyses ont été faites par M.-L. Filippi à l'Institut de Minéralogie et Géochimie de Lausanne.

Les analyses isotopiques ont porté sur la craie lacustre et sur les tests d'une espèce de gastéropodes (*Bithynia tentaculata* (L.)) conformément à la méthode décrite par Mc Crea (1950). Les gastéropodes et les sédiments riches en matière organique ont été traités par NaOCl 5 % (Charef, Sheppard, 1984) pour éliminer la matière organique. Avant les analyses isotopiques, les tests des gastéropodes ont été délicatement nettoyés avec un pinceau fin et par l'action des ultra-sons pendant 10 à 30 secondes. Le facteur de fractionnement est de 1.01025 à 25° C pour l'oxygène (Sharma, Clayton, 1965), il est de 1.00931 à 50° C pour le carbone (Swart *et al.*, 1991) ; ces facteurs ont été utilisés pour les réaction entre CaCO_3 et H_3PO_4 (100%). Tous les rapports isotopiques ont été déterminés par un spectromètre de masse multicollecteur de Finnigan MAT 251. Les résultats sont exprimés en unité standard pour mille (‰) avec référence au standard international PDB (Craig, 1957).

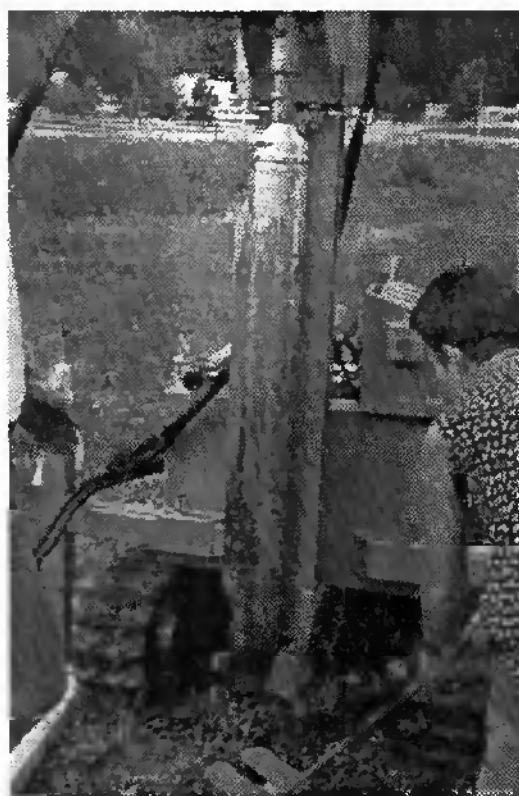
$$\delta \text{‰} = \frac{R \text{ échantillon} - R \text{ standard}}{R \text{ standard}} \times 1000$$

ou R est le rapport ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) ou ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)

3.4.6. Les zones géochimiques, définition

Par souci d'homogénéité, des parties de profils ont été délimitées le plus objectivement possible ; ici ces zones sont appelées *zones géochimiques* par comparaison avec les zones polliniques locales et les zones minéralogiques. En effet, cette zonation ne tient pas compte des facteurs chronologiques, climatiques et stratigraphiques.

Une zone géochimique est donc identifiée lorsque les variations d'un ou plusieurs descripteurs chimiques sont homogènes et propres à cette zone et ne se retrouvent pas de part et d'autre de celle-ci.



Carottier Russe de 1 m monté sur une foreuse APAGEO lors du prélèvement des sédiments du forage LLC1-2 en Août 1992 (photo P. Schoellammer)

Deuxième Partie

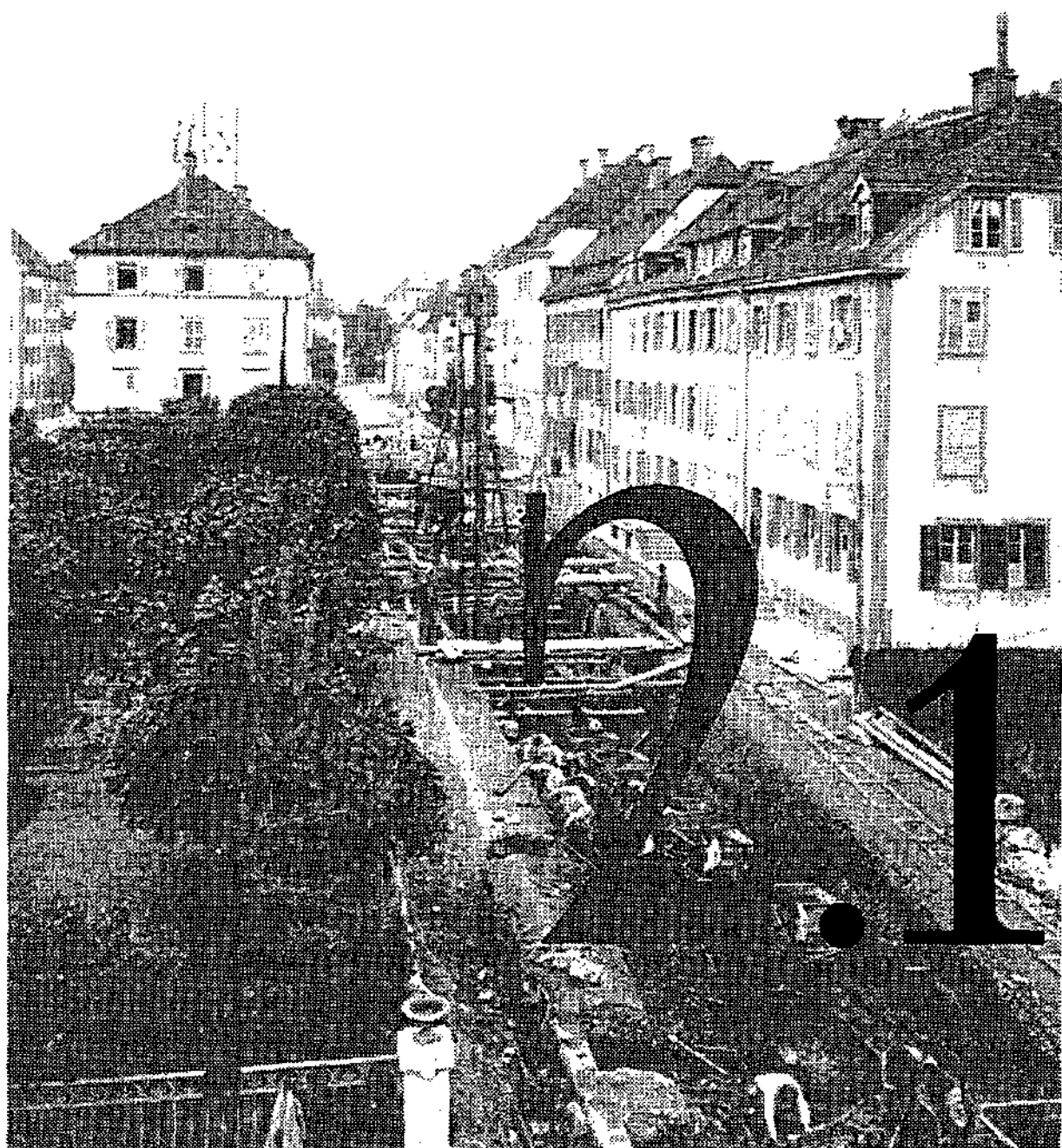
2

*Ô lac ! rochers muets ! grottes ! forêt obscure !
Vous, que le temps épargne ou qu'il peut rajeunir,
Gardez de cette nuit, gardez, belle nature,
Au moins le souvenir !*

Le Lac, 1820 Alphonse de LAMARTINE

Photographie conservée au Musée d'Histoire du Locle montrant les travaux de correction du Bied à la rue des Marais, devant le jardin public en Avril 1900 in Burger, Schaer, 1996

*MORPHOLOGIE DU BASSIN
LACUSTRE, NATURE ET
GÉOMÉTRIE DES CORPS
SÉDIMENTAIRES*



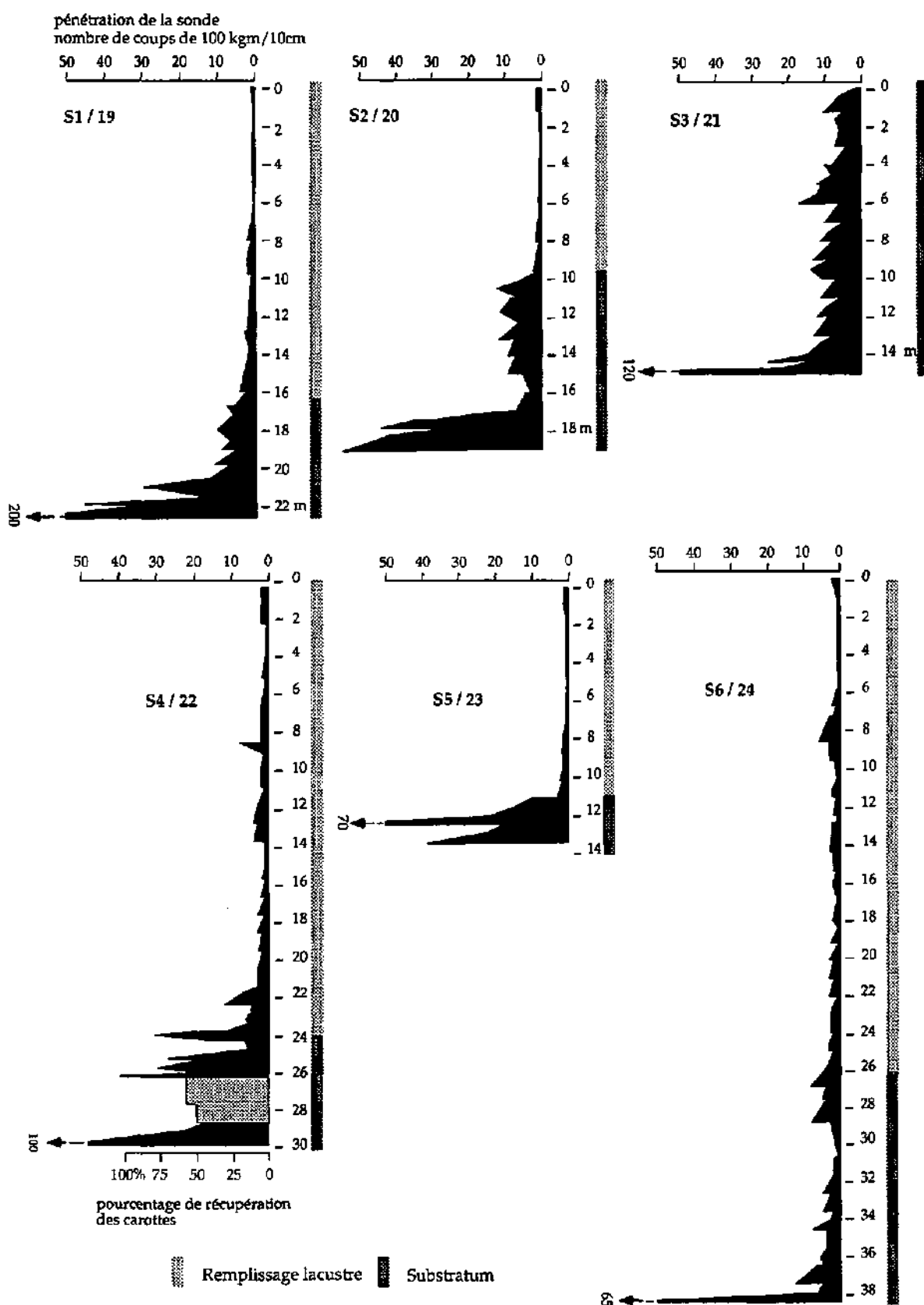


Figure 2.1 : Diagramme de résistance des sols au battage du carottier (d'après les données du laboratoire de géotechnique De CERENVILLE, 1981)

Morphologie du bassin lacustre

1. RECONNAISSANCE DE LA MORPHOLOGIE DU BASSIN LACUSTRE QUATERNAIRE.

Cette reconnaissance a été effectuée au Marais du Col des Roches, à partir d'une prospection géophysique mettant en oeuvre les méthodes électriques. Ce choix présupposait l'existence d'un contraste entre les résistivités électriques du substratum, essentiellement Oeningien dans cette partie du site, et celles des sédiments formant le remplissage du lac quaternaire.

Le substratum oeningien, constitué de roches de nature très variable et poreuse (marne, pierre morte) ainsi que les graviers sus-jacents pris dans une gangue limono-argileuse, apparaissaient avec des teneurs en eau comprises entre 15 et 30 % comme un horizon plutôt compact, ce qu'illustre les diagrammes de résistance mécanique au battage du carottier enregistrés dans plusieurs forages (figure 2.1). Ce substratum pouvait *a priori* se manifester comme une formation électriquement plus résistante que le remplissage lacustre sus-jacent, qui, de la base au sommet, regroupe des sédiments meubles (sédiments argilo-silteux, craies lacustres, limons tourbeux et tourbes), aux teneurs en eau plus élevées (W % compris entre 30 et 700) donc extrêmement poreux et conducteurs. La figure 2.2 présente les corrélations significatives que l'on peut établir par couples de paramètres entre les valeurs de teneur en eau, de l'indice des vides reflétant la texture et de l'indice de compressibilité mesurées sur plusieurs échantillons représentatifs des faciès de ce remplissage.

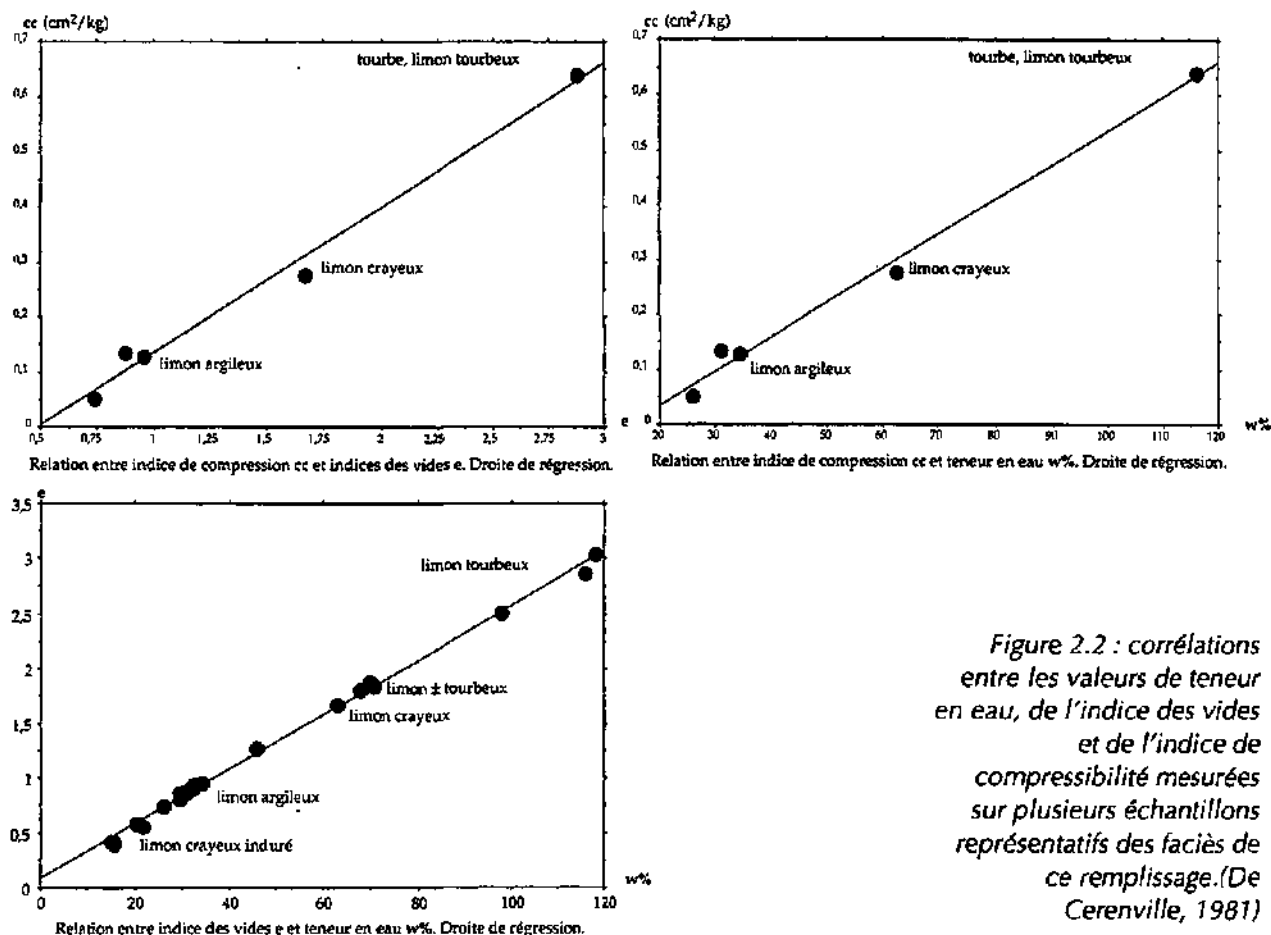


Figure 2.2 : corrélations entre les valeurs de teneur en eau, de l'indice des vides et de l'indice de compressibilité mesurées sur plusieurs échantillons représentatifs des faciès de ce remplissage. (De Cerenville, 1981)

2. RÉSULTATS

Les 37 sondages électriques implantés sur une grille régulière (maille rectangulaire de 50x100 m) ont été exécutés avec des longueurs de ligne déployées parallèlement aux orientations majeures du contexte géomorphologique (figure 2.3). L'acquisition des données selon cette procédure permet une reconnaissance tridimensionnelle, à faible et moyenne profondeur du sous-sol sur toute la surface prospectée, soit environ 15 ha. Au cours de la prospection, des répétitions de mesure ont permis de s'assurer de l'absence d'une dérive climatique de la résistivité.

Les premières images "non interprétées" que l'on peut tirer des courbes de sondages sont des cartes d'isorésistivités pour des demi-longueurs données de quadripôle électrique (figure 2.4) et des pseudo-sections de résistivités (figure 2.5) ; ces documents visualisent, en fonction de la profondeur, respectivement la distribution des résistivités dans un plan sub-horizontale et un plan vertical. Les mesures de résistivité concernent des formations situées à une distance maximale de $AB/4$ du centre du quadripôle. Cet ordre de grandeur s'applique autant vers la profondeur que latéralement. Les résistivités ne se réfèrent pas à un point pour une tranche de sol située à une profondeur déterminée, mais elles intègrent à partir de la surface du sol un volume d'autant plus important et plus étendu que la longueur $AB/2$ du dispositif est grande.

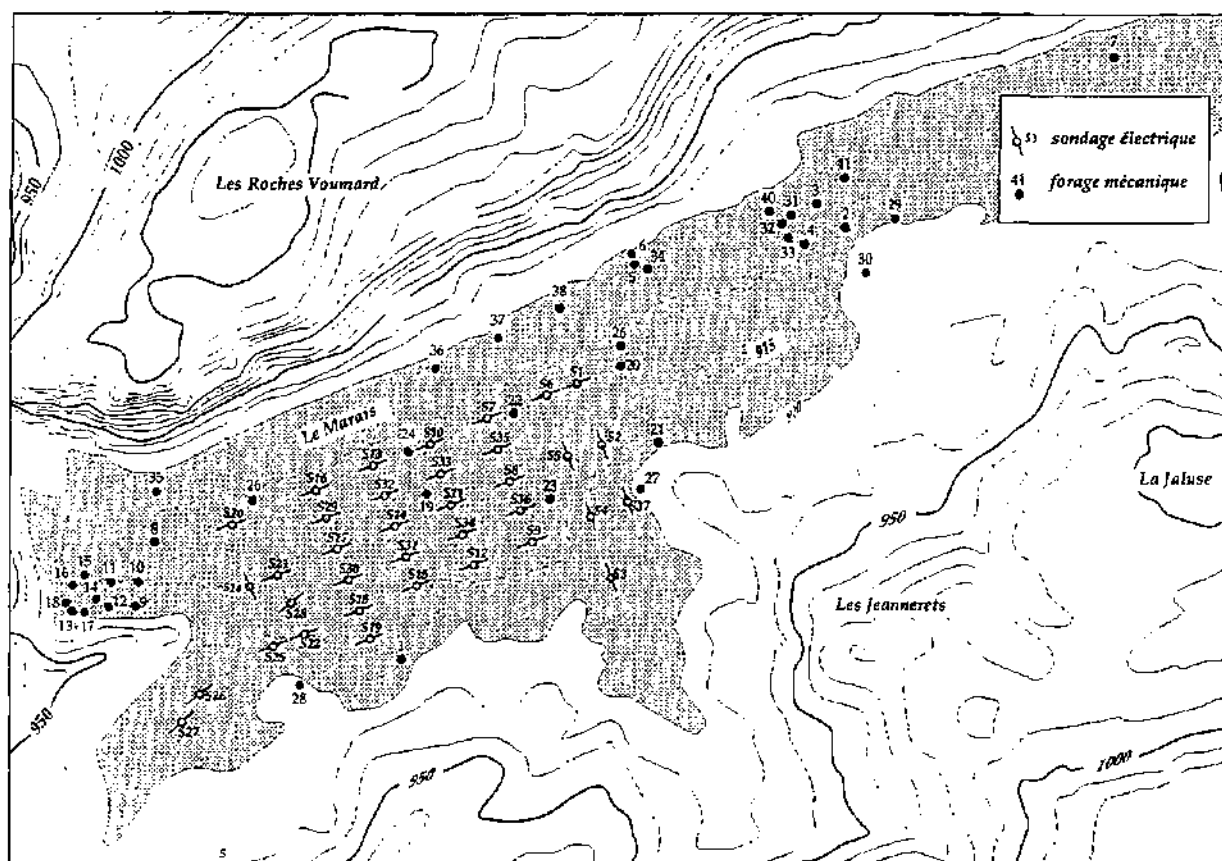


Figure 2.3 : Plan de localisation des sondages électriques et des forages mécaniques

2.1. DISTRIBUTION SPATIALE DES RÉSISTIVITÉS

Entre la surface du remplissage lacustre et une profondeur maximale de 10 m environ (figure 2.4, cartes AB/2 = 1 m à AB/2 = 20 m), la dynamique des variations de la résistivité apparente est faible : les valeurs les plus résistantes ($> 27,5 \Omega m$) se distribuent depuis la base des structures de glissement de "La Molière" (Burger, Schaer, 1996) en direction du centre du Marais sous la forme d'une très large anomalie (A). La limite de son extension latérale est marquée par un gradient quasi rectiligne orienté Nord-Ouest Sud-Est qui, superficiellement, se prolonge à angle droit dans une direction Nord-Est Sud-Ouest. Le maximum de résistivité, anomalie B ($> 45 \Omega m$) est enregistré au pied de la butte "des Calames".

Au delà de cette limite, et dans tout l'espace prospecté du marais, les valeurs de résistivité sont plus conductrices ($< 27,5 \Omega m$), avec un minimum (anomalie D), bien individualisée à la base du promontoire des "Jeannerets" qui constitue le bourrelet principal du glissement de "La Jaluse" (Burger, Schaer, 1996).

A plus grande profondeur (de AB/2 = 30 m à AB/2 = 150 m) les valeurs s'échelonnent sur une gamme de résistivités un peu plus étendue, de 20 à plus de 70 m. Les valeurs plus résistantes ($> 27,5 \Omega m$), se distribuent toujours depuis la base du glissement de "La Molière" mais avec un maximum de résistivité ($> 45 \Omega m$), anomalie (B') décalé vers l'Est, et située maintenant dans le prolongement d'un épaulement qui depuis la ferme de La Molière

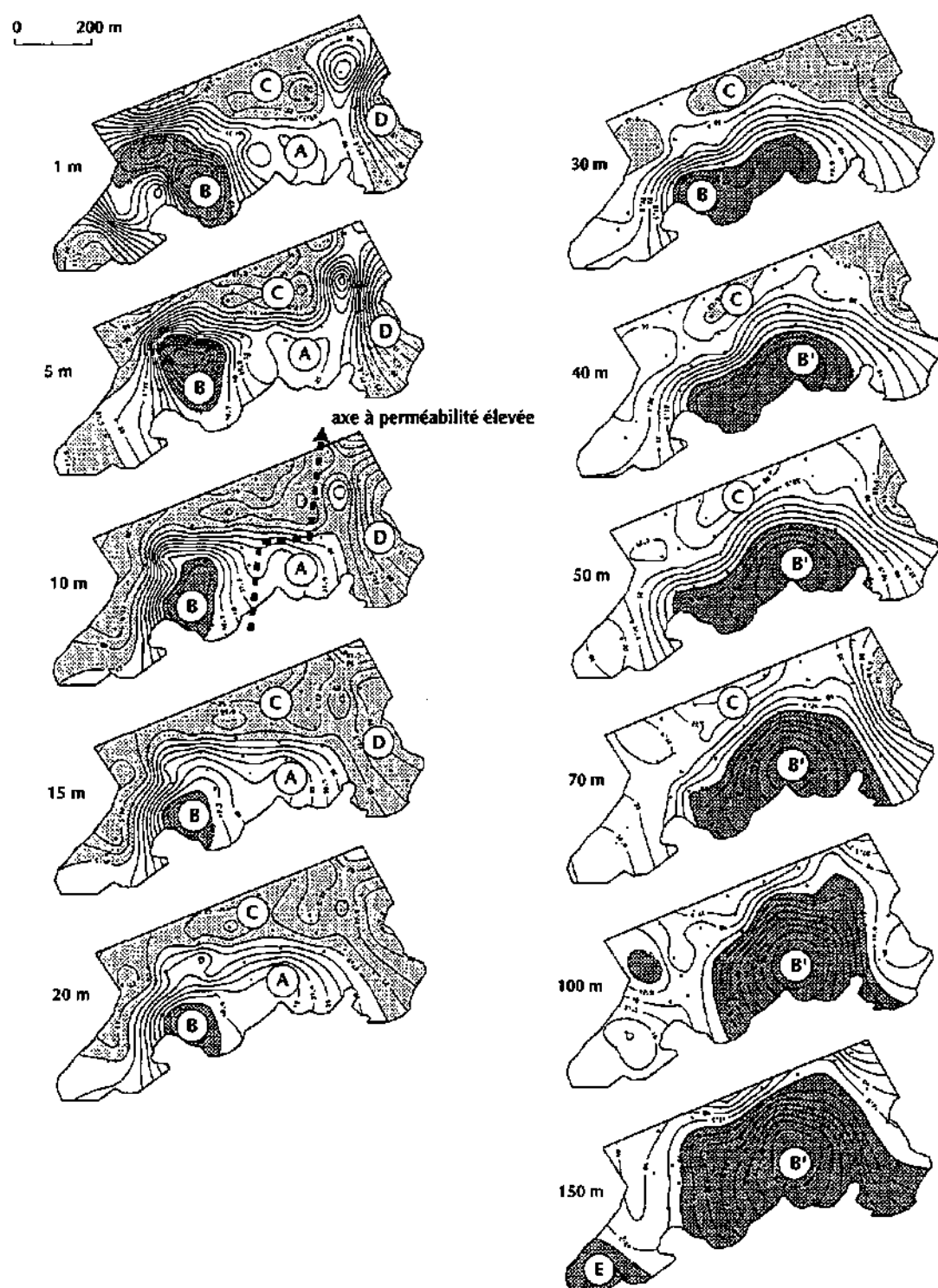


Figure 2.4 : Distribution spatiale des résistivités apparentes AB/2 de 1 à 150 m

s'avance dans le Marais. Compte tenu de l'effet intégrateur des plus grands quadripôles, la croissance en amplitude ($> 70 \Omega m$) et en extension de cette anomalie B' implique que la structure à l'origine de cette anomalie se poursuit et s'étend en profondeur. L'anomalie résistante E, décelée à grande profondeur (carte en $AB/2 = 150 m$) dans la combe des "Calames" pourrait matérialiser à cet endroit l'extension de cette structure.

A l'inverse, la diminution de la taille des anomalies les plus conductrices, C et E (< 27.5 Ω m) que l'on constate avec l'augmentation de la profondeur atteste d'un rétrécissement de leur forme vers le bas, avec un effet intégrateur qui s'exprime cette fois en sens contraire.

2.2. STRUCTURE DU SOUS-SOL ASSOCIÉE AUX ANOMALIES DE RÉSISTIVITÉ

Douze pseudo-sections de résistivités ont été construites selon deux directions perpendiculaires recoupant longitudinalement et transversalement le Marais (figure 2.5 a, b, c et d).

Sur chaque pseudo-section de résistivité sont représentées en échelle logarithmique, les longueurs AB/2 (m) du dispositif de mesure, les profondeurs d'investigations maximales correspondantes ainsi que les logs stratigraphiques simplifiés des forages les plus proches, projetés sur l'axe de la coupe.

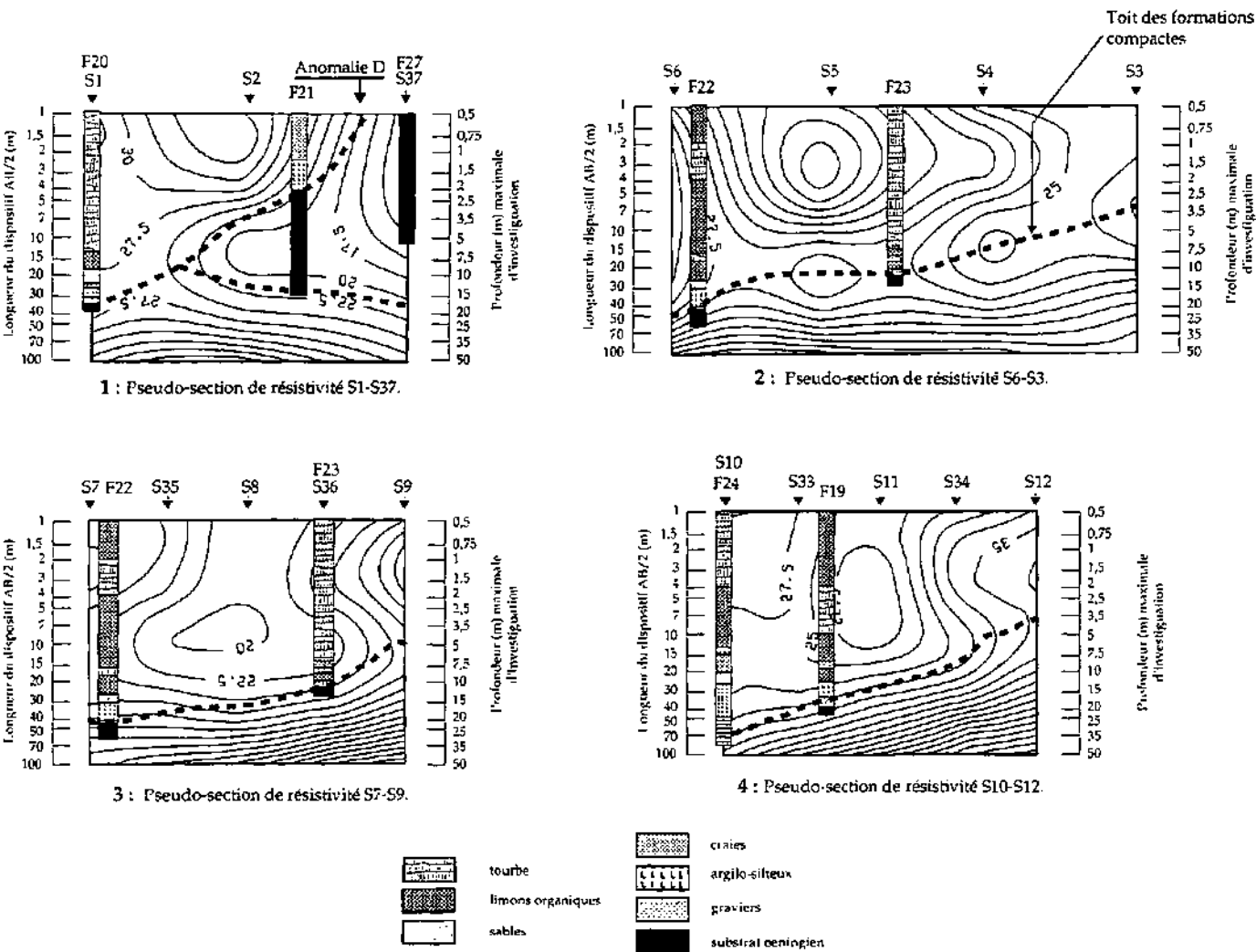


Figure 2.5 a : Pseudo-section de résistivité recoupant transversalement le Marais d'après les données de G. Bossuet

Morphologie

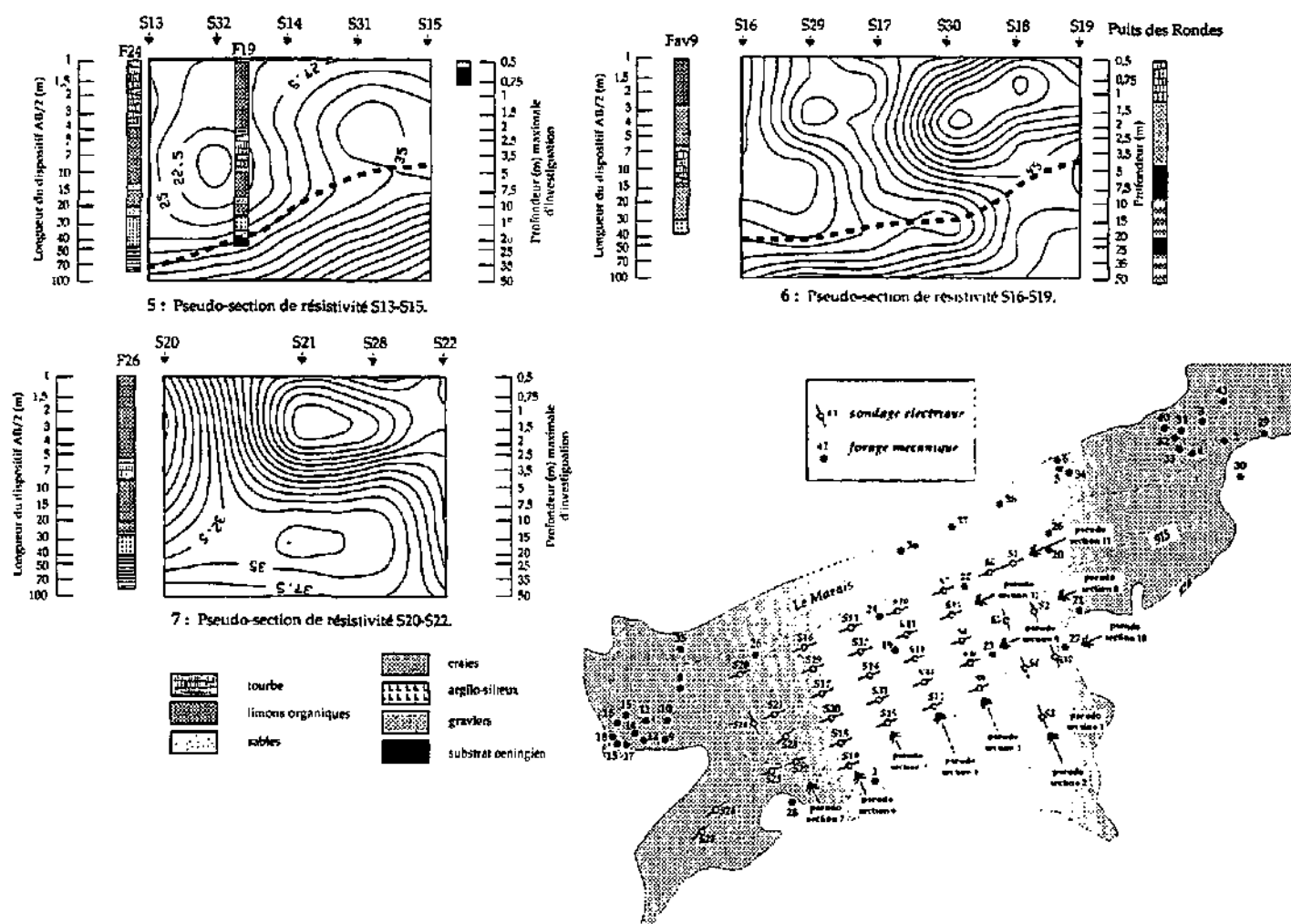


Figure 2.5 b : Pseudo-section de résistivité recoupant transversalement le Marais d'après les données de G. Bossuet

L'examen de l'ensemble de ces coupes, permet de faire sur la morphologie du bassin lacustre les observations suivantes :

- le gradient vertical qui affecte en profondeur les courbes d'isorésistivité coïncide dans la majorité des forages avec l'apparition des niveaux du substratum oeningien, pierre morte indurée en alternance avec des faciès marneux plus tendres (pseudo-section 1, figure 2.5 a) ; ce gradient marque aussi, dans l'axe du synclinal notamment (pseudo-section 11, 12, figure 2.5 d) le sommet des sédiments détritiques grossiers à texture compacte, accumulés à la base du remplissage lacustre (gravillons et graviers calcaires dans une matrice de limons argileux et sableux). Sur les pseudo-sections de résistivités transversales 3 à 7 (figure 2.5 a et b), ce gradient et la forme convexe des courbes d'égale résistivité témoignent d'une remontée très prononcée du toit « résistant » du substratum oeningien en direction du versant Sud-Est. A l'inverse, celui-ci plongerait en direction du versant opposé au Nord-Ouest ; à son approfondissement maximum (pseudo-section 12, sondages 16 et 13 ; figure 2.5 d), dans l'axe du synclinal, seuls les dépôts grossiers qui lui sont immédiatement superposés affecteraient la distribution en profondeur de la résistivité.

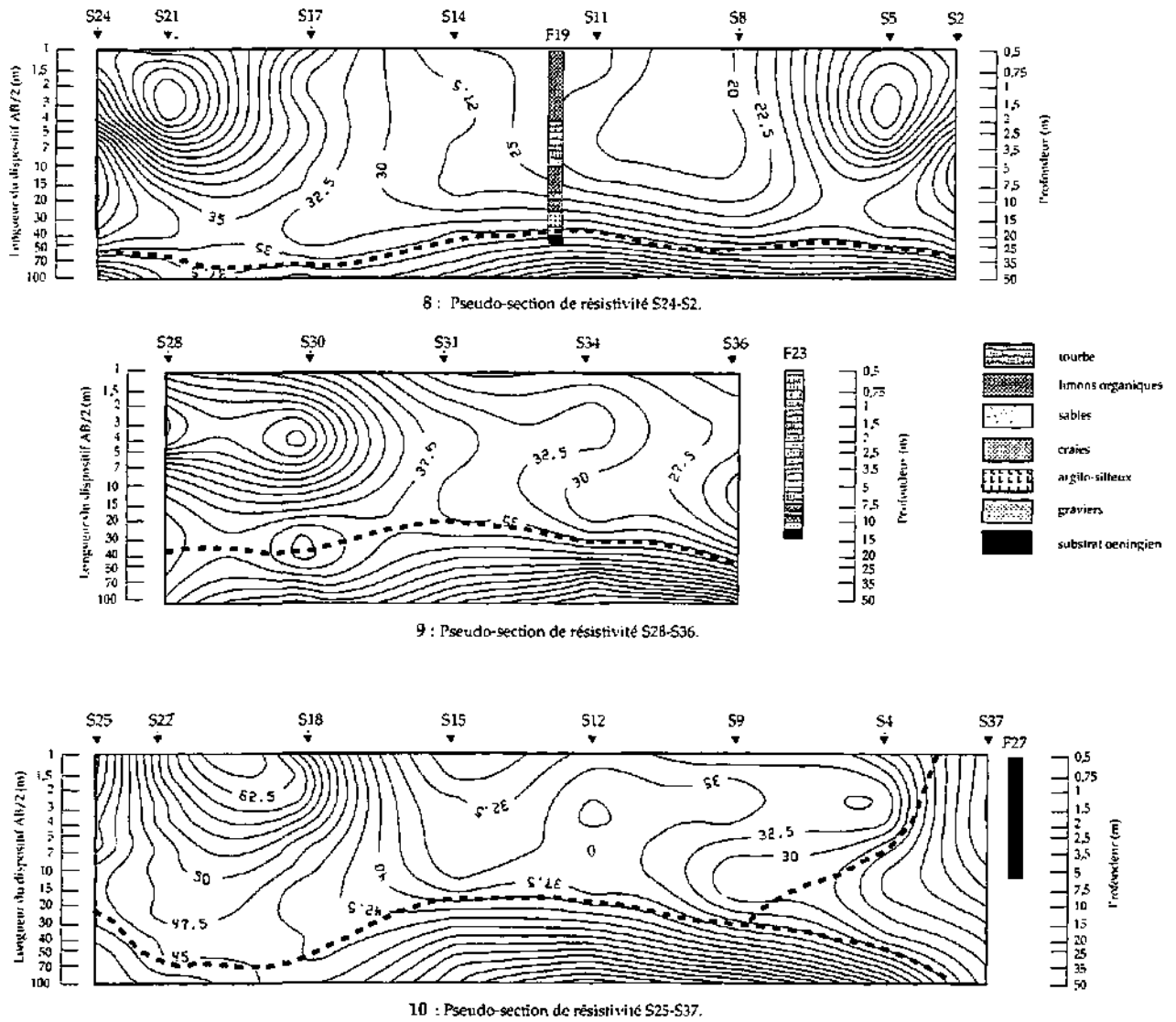


Figure 2.5 c : Pseudo-section de résistivité recoupant longitudinalement le Marais d'après les données de G. Bossuet

- pour les anomalies D et B, les gradients verticaux et latéraux de résistivité (pseudo-sections 1, 2, 8,) attestent du caractère superficiel et de l'extension limitée de ces discontinuités ; ces anomalies résulteraient respectivement du glissement depuis le versant Sud-Est, de marnes très conductrices ($< 20 \Omega\text{m}$) pour l'anomalie D, et de matériaux essentiellement calcaires (sables et graviers sans matrice) plutôt résistants, pour l'anomalie B.

- s'agissant du remplissage lacustre quaternaire, l'interface de sa base avec le sommet des graviers ou du substrat s'individualise relativement bien en profondeur ; ce remplissage montre par contre d'importantes variations latérales de résistivité liées aux changements intervenant dans la nature et la texture des horizons intéressés par la mesure, mais liées aussi à la position de ces horizons par rapport au niveau de la nappe superficielle dans le marais.

Morphologie

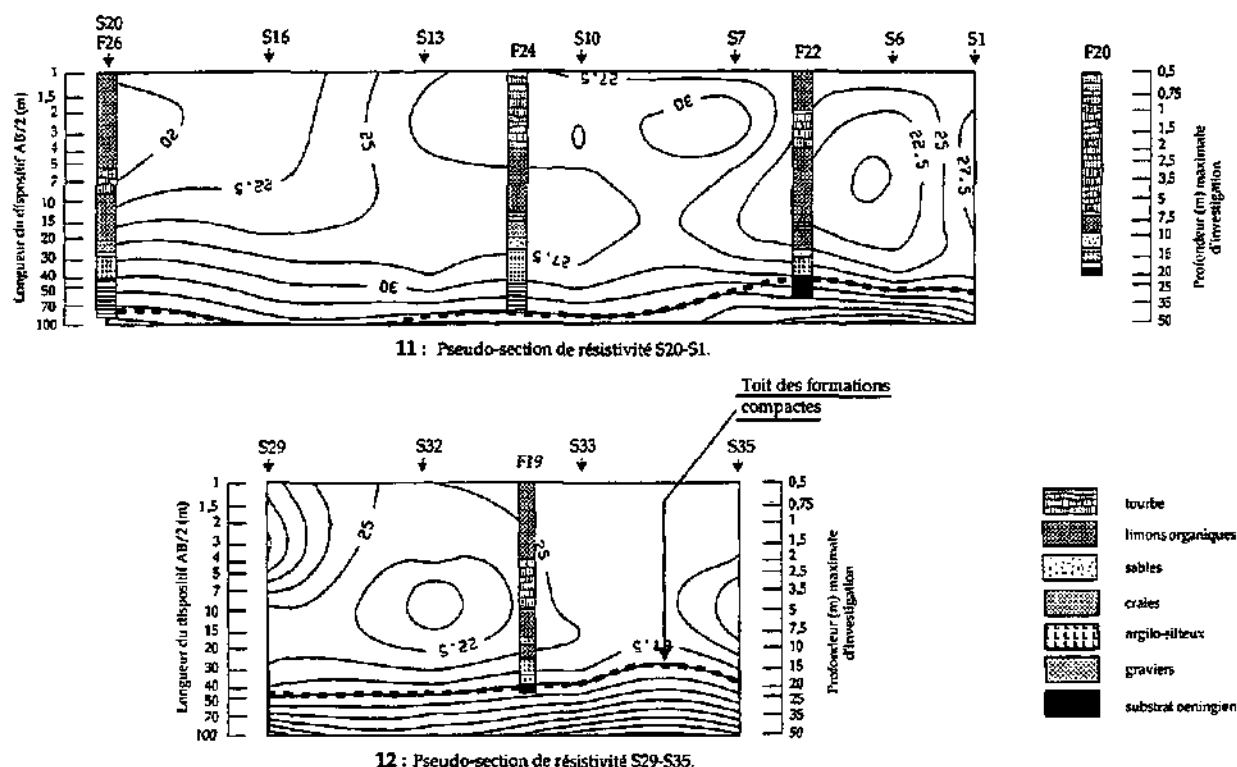


Figure 2.5 d : Pseudo-section de résistivité recoupant longitudinalement le Marais d'après les données de G. Bossuet

2.3. INTERPRÉTATION DES CARTES DE RÉSISTIVITÉ

La succession des cartographies de la résistivité des plus faibles aux plus grandes profondeurs permet de proposer l'interprétation suivante :

L'anomalie résistante B, enregistrée à l'aplomb d'une remontée du substratum, matérialiserait la poursuite, dans le remplissage lacustre, de l'accumulation des matériaux à l'origine du bombement topographique de la butte des "Calames" ; leur nature reconnue superficiellement par un sondage serait essentiellement calcaire (sables et graviers pratiquement sans matrice) et l'origine des éléments, jurassique et crétacé.

L'anomalie D, située à la base du promontoire des "Jeannerets" marquerait le prolongement dans le Marais du bourrelet principal du glissement de "La Jaluse". Sa nature exclusivement marneuse, reconnue jusqu'à 5 m de profondeur par un forage à la tarière expliquerait alors les valeurs très conductrices enregistrées dans cette partie du site.

Plus généralement, la comparaison des cartographies les plus superficielles de la résistivité ($AB/2 = 1\text{ m}$ à $AB/2 = 10\text{ m}$) avec une cartographie de la surface piézométrique (figure 2.6) montre également que la distribution de la résistivité est influencée par la position du niveau de la nappe phréatique et le rabattement résultant du pompage du puits des Rondes. Selon Burger, Schaer (1996), « ...dans l'aquifère profond qu'exploite ce puits, le rabattement piézométrique autour de l'ouvrage n'est pas symétrique mais au contraire orienté dans la direction préférentielle de l'appel d'eau, suivant un axe à perméabilité élevée que reflète le sillon dans la nappe superficielle... ». Sur la carte en $AB/2 = 5\text{ m}$ par exemple, c'est la direction de cet appel

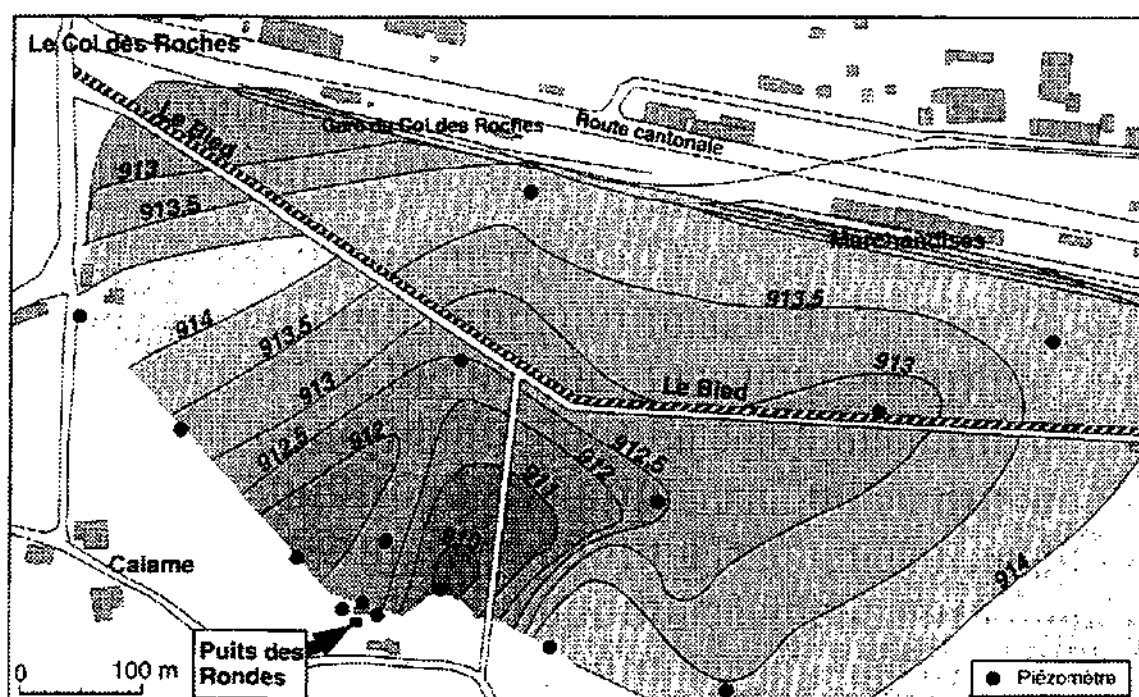


Figure 2.6 : Déformation de la surface piézométrique de la nappe phréatique, sous l'effet du pompage dans l'Oeningien sous-jacent, au puits des Rondes ; les lignes isopièzes sont exprimées par leur altitude (d'après Burger, Schaer, 1996)

d'eau que suivraient parallèlement, depuis le puits des Rondes le tracé des courbes d'isorésistivité comprises entre 27.5 et 35 Ω m.

A plus grande profondeur (de $AB/2 = 15$ m à $AB/2 = 150$ m), la cartographie figurerait le prolongement dans le Marais des structures à l'origine du relief mouvementé des pentes du versant Sud-Est du bassin.

Entre la butte des "Calames" et la ferme de la "Molière", le substratum oeningien résistant présente une succession de niveaux dans lequel prédomineraient les bancs calcaires compacts par rapport aux passées argileuses plus tendres ; il s'enfoncerait "peu profondément" assez loin dans le Marais dans la zone délimitée par le contour de l'anomalie A. A partir de 20 m de profondeur environ, cette extension s'effectuerait depuis un épaulement (calcaire ?) localisé au droit de l'anomalie B'. Corrélativement, c'est dans cette zone que l'épaisseur des sédiments lacustres déposés serait la plus faible.

A l'inverse, la zone où le remplissage lacustre, tous faciès sédimentaires confondus, serait le plus épais se situerait plutôt dans l'axe du synclinal (plages de résistivité de l'anomalie C) et donc proche de son versant le plus abrupt compte tenu de la dissymétrie transversale de son relief.

Morphologie

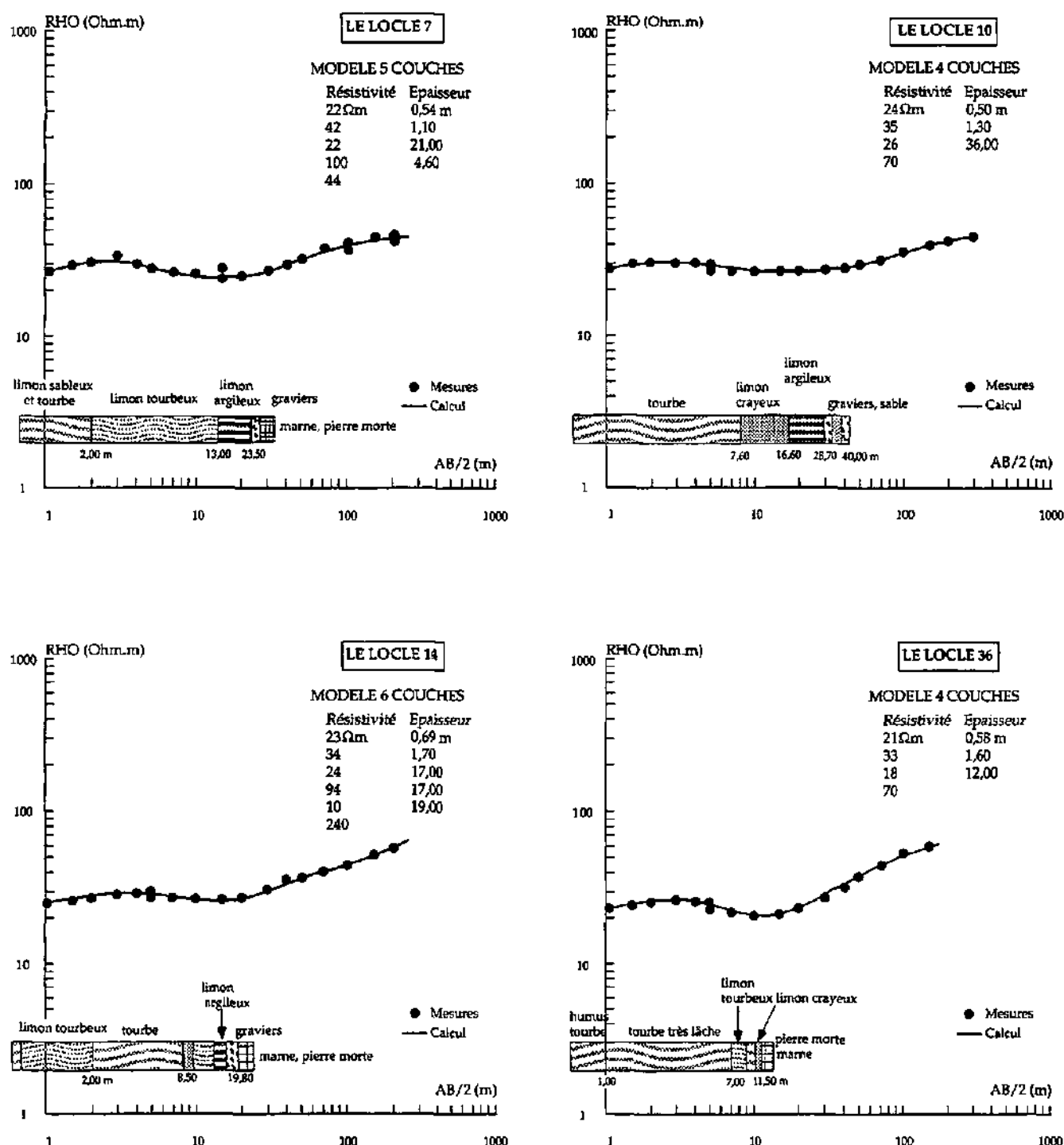


Figure 2.7 : Sondages électriques paramétrés sur les logs stratigraphiques des forages mécaniques

2.4. INTERPRÉTATION QUANTITATIVE DES SONDAGES ÉLECTRIQUES

L'interprétation directe des 37 courbes expérimentales de sondages a été développée à partir d'un logiciel d'interprétation automatique à deux niveaux de précision : méthode de Gosh avec un filtre à 9 coefficients et méthode de Johansen avec un filtre à 140 coefficients (Gosh, 1971 a et b ; Zohdy, 1989). Grâce aux sondages électriques paramétrés sur 4 forages carottés (figure 2.7), il a été possible de déterminer l'épaisseur du remplissage lacustre

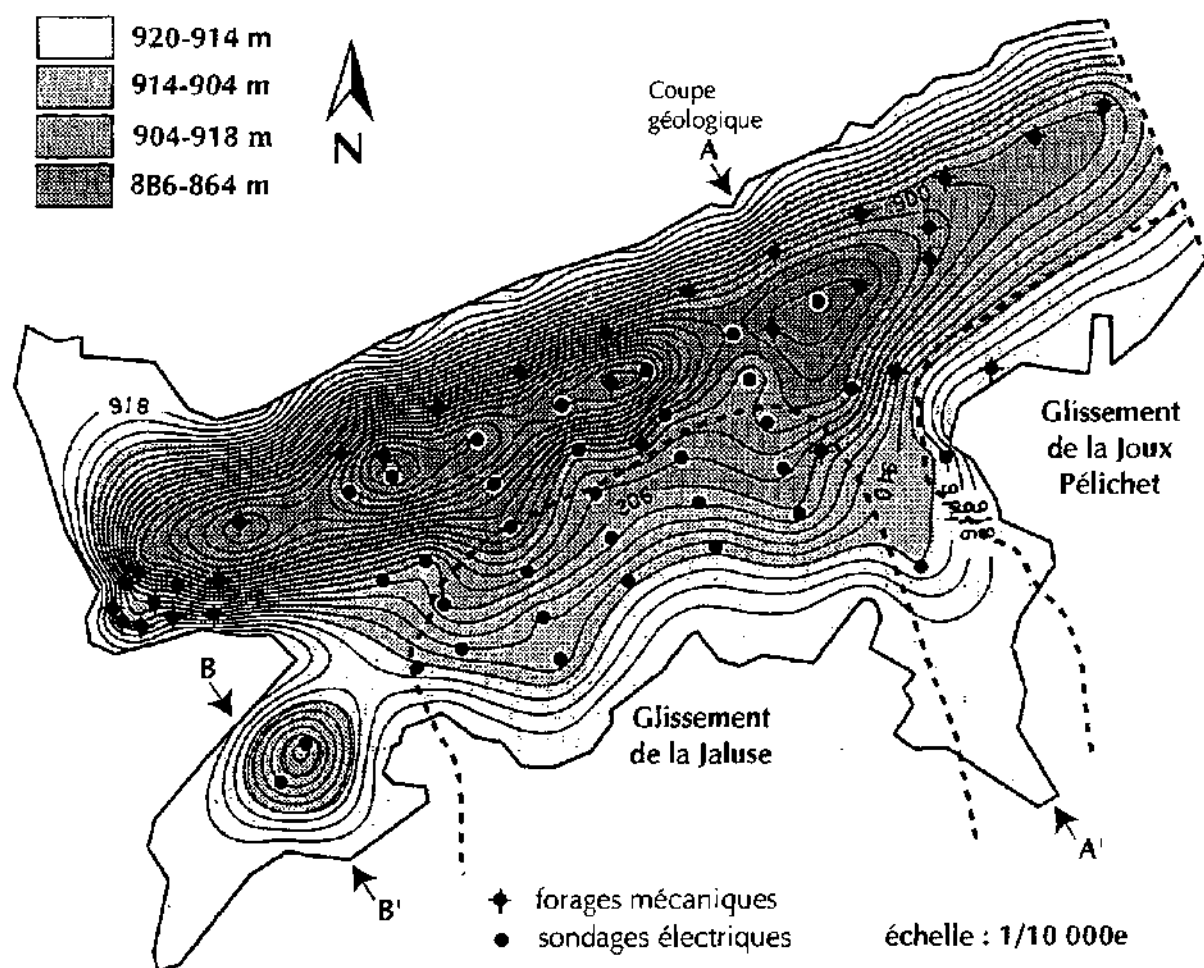


Figure 2.8 : Représentation cartographique en courbes isohypses de la base du remplissage lacustre meuble

meuble et de fournir une cote relativement précise du toit des formations compactes sous-jacentes, qu'elles soient indifféremment constituées par la pierre morte et les marnes du substratum oeningien ou par les graviers qui le surmontent.

Les sondages électriques et les forages mécaniques ont permis de représenter la cartographie, en courbes isohypses, de la base du remplissage lacustre meuble (figure 2.8). On constate que la topographie du toit des formations compactes dessine une structure en terrasses comparable à celles décrites en surface par Burger et Schaer (1996) dans le secteur de la Jaluse par exemple. Les nombreux glissements décrits par ces auteurs affectent l'Oeningien qu'il soit de nature marneuse ou crayeuse. Ces glissements, d'orientation Sud-Nord (versant abrupt), sont entaillés latéralement par les vallons perpendiculaires à celui du Locle (La combe Girard, la combe de la Jaluse, la combe des Jeannerets...). La zone la plus profonde apparaît ainsi relativement étroite ; elle se situe dans l'axe synclinal du vallon de Locle, allongée parallèlement au versant le plus abrupt. Le toit des formations lacustres compactes se trouve aux environs de la cote 880 m.

Morphologie

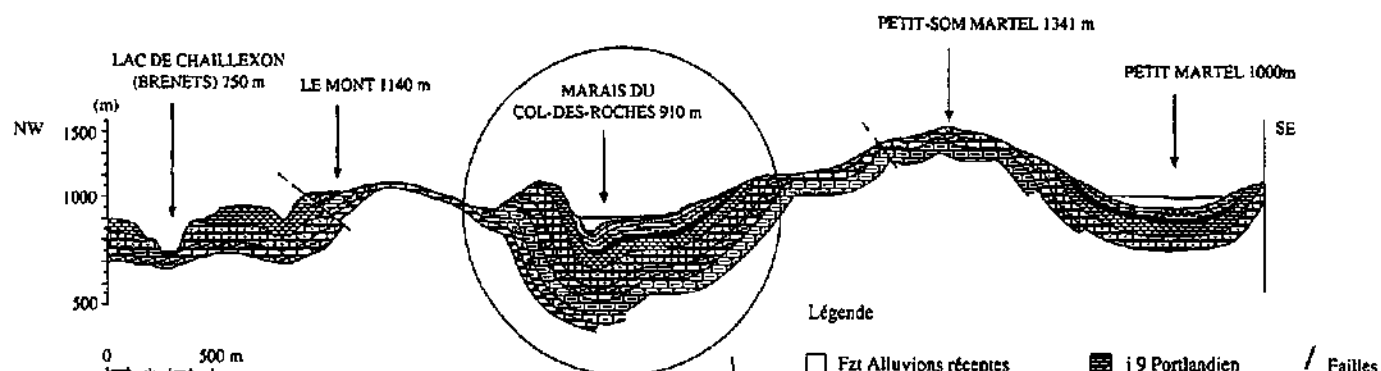


Figure 2.9 a : Coupe géologique interprétative (A- A') à travers les formations géologiques de la région du Locle

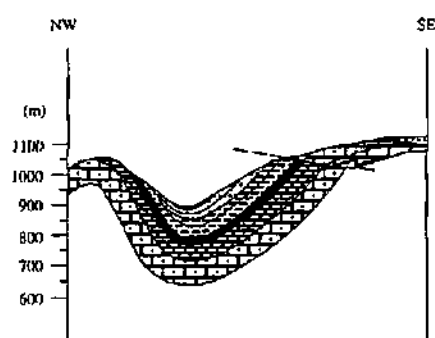


Figure 2.9 b : Coupe géologique interprétative (B- B') à travers les formations géologiques de la région du Locle

La construction de deux coupes géologiques interprétatives à travers les différentes formations géologiques valident les informations fournies par la géophysique sur la paléotopographie du synclinal du Locle-La Chaux-de-Fonds (Figure 2.9 a et b). La cartographie des formations géologiques présentes sur la carte géologique de Morteau a été faite par Favre (1911).

3. GÉOMÉTRIE DES CORPS SÉDIMENTAIRES

La géométrie des corps sédimentaires a été appréhendée à partir de 50 forages effectués depuis le début de ce siècle dans le Marais du Col-des-Roches avec un degré de précision dans la description sédimentaire variant selon la finalité des forages (annexe n° 1).

3.1. DESCRIPTION DES CORPS SÉDIMENTAIRES

De l'exécution échelonnée dans le temps de ces 50 forages découlent deux problèmes :

- la gestion de l'ensemble de cette masse de données sédimentaires ;
- la nécessité de décrire de façon homogène tous les niveaux sédimentaires observés depuis les forages les plus anciens jusqu'aux forages les plus récents.

Ces problèmes ont été résolus par le recours à un système informatique utilisant le logiciel *STRATO* (Brochier *et al.*, 1991 ; Corboud, 1991 ; Bossuet *et al.*, 1993 ; Bossuet, 1994 ; Bossuet *et al.*, 1996). Ce système permet la description des couches sédimentaires du remplissage et leur représentation graphique ; ce logiciel permet en particulier de dessiner les logs des différents forages sous forme de transects.

L'homogénéité de la description est assurée par un système de codage des sédiments et un enregistrement au moyen de trois critères qui définissent de façon objective chaque niveau. Ces niveaux sont décrits en distinguant deux matrices sédimentaires : la primaire (ou principale) et la secondaire, et l'adjonction de codes de traces qui permettent d'intégrer des éléments observés de manière discontinue dans un niveau. La matrice principale indique toujours le caractère dominant dans le niveau. Lorsque la sémantique descriptive est fixée, la définition de chaque niveau est repérée par la profondeur de son sommet et de sa base. Cette description obéit à une syntaxe stricte qui est contrôlée par un logiciel de saisie au moment de l'entrée des données dans l'ordinateur. La liste et la définition des matrices et des traces propres aux sédiments du Col-des-Roches est présentée en annexe n° 2.

3.2. LE REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE

Le remplissage du Locle présente une séquence stratigraphique typique des comblements des lacs jurassiens à savoir : des dépôts détritiques à la base du remplissage (sables et graviers, silts et sédiments argilo-silteux), puis des dépôts bio- géochimiques (craies lacustres) et enfin des dépôts organiques au sommet (tourbes, débris végétaux). Plusieurs faciès ont été distingués à l'intérieur de ces trois ensembles.

Dépôts détritiques :

- des limons finement sableux, gris-beige à olive, contenant des lits de débris organiques (LIS) ;

Morphologie

- des limons argileux, brun à gris, un peu crayeux avec des gravillons (LAG) ;
- des graviers et des gravillons (GRA) qui peuvent être enrobés dans une matrice limono-argilo-sableuse (GAS) ;

- des sables plus ou moins grossiers (SAG, SAB, SLA) ;
- des limons argileux varvés de sables fins (RAG, RAS, RLS).

Dépôts bio-géochimiques :

- un premier dépôt correspondant aux craies de couleur grise ou ocre, riches en mollusques (LTO) ;
- un second dépôt regroupe les sédiments intermédiaires entre les craies et les tourbes, comme par exemple les gyttjas crayeuses et constitue un continuum entre les niveaux tourbeux et les alternances de limons crayeux et les limons tourbeux et les craies proprement dites (LCR).

Dépôts organiques, 5 types principaux qui sont de la base au sommet :

- des tourbes décomposées de couleur brun-noir (TON) ;
- des tourbes et limons tourbeux à bois (TLB) ;
- une alternance de tourbe et limon tourbeux et/ou limon crayeux (RTC) ;
- une alternance de tourbe et limon tourbeux (RTL) ;
- une alternance de tourbe et limon tourbeux et/ou limon sableux (RTS).

3.3. RÉPARTITION DES CORPS SÉDIMENTAIRES

La géométrie des corps sédimentaires a été appréhendée à partir de profils stratigraphiques longitudinaux d'orientation Nord-Est/Sud-Ouest et de profils transversaux d'orientation Nord-Nord-Ouest/Sud-Sud-Est. Les profils montrent que la dynamique sédimentaire du comblement est très influencée par la morphologie du substratum et les variations locales morphostructurales.

Les profils transversaux montrent que le substrat est atteint à moins de 15 m de profondeur dans la partie sud du Marais (forage 23). Le toit de la roche mère se trouve, au contraire à près de 25 mètres (forage 22) dans l'axe principal de la dépression du Locle. En bordure du remplissage lacustre, du côté du versant le plus abrupt, le substrat est atteint à 1 voire 2 mètres de profondeur. Dans ces forages, une mince couche sédimentaire détritique est intercalée entre le substratum et des niveaux tourbeux peu épais (forage 37).

Un des profils longitudinaux (entre les forages 15 et 29) met en évidence une remontée du substrat séparant (forage 20) deux zones de plus grande profondeur. La succession pôle détritique, pôle carbonaté et pôle organique ne se rencontre que dans la partie ouest de l'ancien lac. Dans la partie est, séparée de la précédente par la remontée du substrat, les formations organiques viennent coiffer directement les formations détritiques. Les épaisseurs de ces formations sont nettement moins importantes dans cette partie du lac.

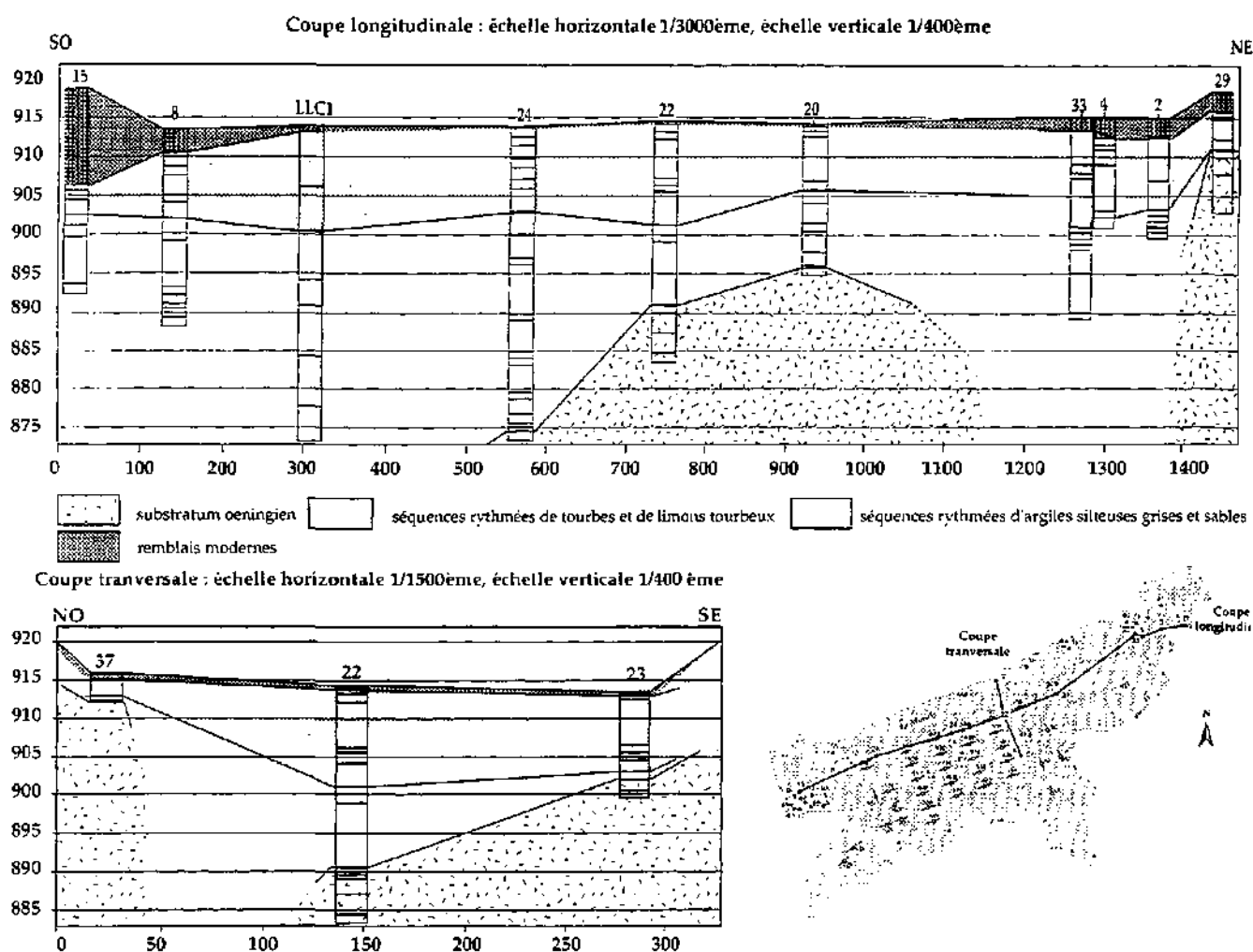


Figure 2.10 : Répartition des corps sédimentaires dans le lac quaternaire du Locté

Les séquences les plus dilatées apparaissent dans les forages 24 et 25. La description des différents faciès sédimentaires du forage 25 qui correspond aux forages LLC1, LLC1-2, LLC1-3 et 4 et LLC1-5 et 6 est donnée en annexes n° 3. Le toit du substrat est atteint à 40 m dans le forage 24 alors qu'il n'a pas été atteint dans le forage 25, où sont encore observés des sédiments détritiques, à 41 m de profondeur. Les formations détritiques (argiles, limons argileux, sables et graviers) peuvent atteindre entre 25 et 30 mètres d'épaisseur dans la partie la plus profonde du lac ; l'épaisseur de ces faciès sédimentaires varie entre 15 et 5 m dans l'autre partie du lac. Le passage à la sédimentation carbonatée se produit à la cote 900 m environ. L'épaisseur des sédiments carbonatés est peu importante (2 m) ; elle est localisée dans la partie la plus profonde. La sédimentation organique est rencontrée dans tous les forages avec une épaisseur comprise entre 5 et 10 m.

Peu de forages ont été exécutés dans la partie du Marais qui a été prospectée par les méthodes géophysiques.

Morphologie du bassin lacustre

4. RÉSUMÉ

1 - Cette étude permet de donner une représentation spatiale du toit des formations compactes de ce remplissage lacustre.

2 - Ces données permettent également de mettre en évidence la morphologie de la base du remplissage dont on pouvait prévoir l'allure à partir de coupes géologiques :

- une dissymétrie transversale (Nord-Sud) affecte les formations géologiques et le remplissage lacustre depuis le versant abrupt jusqu'au versant en pente douce.

- une zone profonde (supérieure à 41 m) et étroite est localisée dans l'axe du synclinal, en bordure du versant abrupt.

- dans cet axe synclinal, il est possible de distinguer deux zones de sédimentation séparée par un seuil lié à la présence d'accidents structuraux affectant le substratum.

3 - la structure de glissement de la Molière, identifiable en surface, est très bien repérée en profondeur sur le versant en pente douce.

4 - L'image obtenue par la distribution spatiale des résistivités dans les couches les plus superficielles du remplissage suit l'axe de perméabilité induit par le puits des "Rondes".

5 - La synthèse des données sédimentologiques issues des forages anciens et récents permet d'appréhender la répartition des corps sédimentaires :

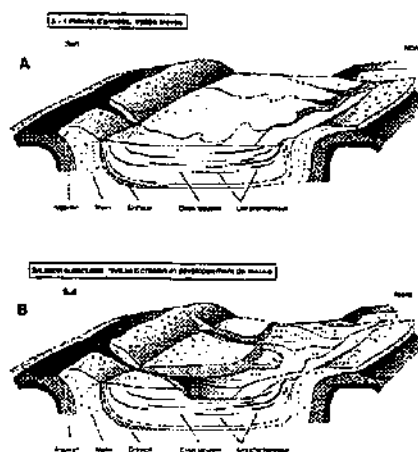
- de nombreux passages latéraux de faciès sont observés dans la zone la plus profonde du Marais

- le passage entre les faciès détritiques et les faciès autochtones se fait approximativement à la cote 900 m.

- une certaine tabularité des couches autochtones recouvrant les couches sédimentaires détritiques est observée. De plus, un léger pendage orienté ENE-WSW affecte ces couches autochtones vers la zone profonde.

Les points de forage du Locle ont été implantés à partir de ces nouvelles données, des travaux anciens de Favre (1911), de données géotechniques récentes (De Cerenville, 1981), et en fonction de l'emplacement des constructions, du réseau de voiries et de l'accessibilité aux parcelles. Malheureusement, et pour cette dernière raison, aucun forage n'a pu être réalisé dans le centre du Marais.

Évolution morphologique de la vallée du Locle et de son façonnement fluvial (B) à partir de l'ancienne surface d'érosion (A) encore conservée du Crêt du Locle à la Chaux-de-Fonds in Burger, Schaer, 1996



Histoire de la végétation



Photographie aérienne de la Combe argovienne de Entre deux Monts, vue de l'est, avec ses prairies sur roches marneuses, bordées de part et d'autre par les crêts calcaires du Malm, sur lesquels persiste la forêt. Dans le coin supérieur droit, on peut voir les prairies de la plaine du Locle in (Burger, Schaer, 1996)

Histoire de la végétation

Les changements intervenus dans la végétation du Jura neuchâtelois sont connus dans les grandes lignes, depuis le début des années 30 grâce aux travaux de Keller (1928) et de Spinner (1926 a, b ; 1927 a, b, c ; 1929). Mais les premières recherches sur les marais tourbeux de la région des Ponts sont beaucoup plus anciennes ; elles ne concernent pas la palynologie mais la genèse des tourbières. Ces études remontent au début du XIX^{ème} siècle (Lesquereux, 1844). Il faut attendre près de 40 ans pour que de nouvelles investigations, avec des techniques modernes, soient engagées. Matthey (1971) a entrepris, dans la vallée des Ponts au Sud, les premières analyses polliniques auxquelles il est encore possible de se référer actuellement. Les plus récents travaux sont ceux qui concernent la vallée du Doubs (Campy *et al.*, 1985 ; Di Giovanni, 1994 ; Cupillard *et al.*, 1994). Le secteur des Franches-Montagnes, plus au Nord, a également fait l'objet de travaux beaucoup plus récents (Hubschmid, Lang, 1985 ; Reille, 1991 ; Guélat *et al.*, 1993). Le Marais du Col-des-Roches n'avait donc à ce jour jamais été retenu pour une étude paléoenvironnementale détaillée. Plusieurs forages, décrits en annexes n°3 et 5 (LLC 1, LLC 2, LLC 1-2, LLC 1-3 et 4, LLC 1-5 et 6 effectués respectivement en 1992, 1993 et 1994 avec le soutien financier du PNR 31) ont été étudiés pour la séquence sédimentaire qu'ils présentaient et pour l'intérêt palynologique particulier que ces forages étaient susceptibles de fournir sur l'histoire de la végétation régionale. L'échantillonnage a été effectué systématiquement tous les 5 à 10 cm suivant les forages ; au total 424 échantillons ont été préparés et analysés représentant près de 200 000 grains de pollens et de spores répartis dans 118 taxons.

1. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES DES FORAGES DU MARAIS DU COL-DES-ROCHES (NEUCHÂTEL, SUISSE)

Les descriptions des zones polliniques locales de tous les diagrammes se trouvent en annexes n°4. Les descriptions lithologiques du forage LLC1 sont en annexe n° 3.

1.1. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES DU FORAGE LLC1

Le diagramme 1 (planche 2.11, hors-texte), présente les pourcentages relatifs des analyses polliniques comptabilisant les *taxa* tertiaires. Le diagramme 2 (planche n° 2.12, hors-texte), présente également les pourcentages mais en excluant des totaux les *taxa* tertiaires. La zonation pollinique (cf. chapitre Méthodes et Techniques : § 3.1.2.4 et 3.1.2.5) proposée est la même dans les deux diagrammes. Le diagramme 3 (planche 2.13 hors-texte) présente les pourcentages relatifs des taxons pour la partie supérieure du forage LLC1.

1.2. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES DES FORAGES LLC1-2 À LLC1-5

Le diagramme 4 (planche 2.14, hors-texte) est un diagramme synthétique construit à partir des analyses du forage LLC 1-2, des forages jumeaux LLC 1-3 et 4 et des forages LLC 1-5 et LLC 1-6 (annexes n° 3) réalisés à environ 2 m de LLC1. Les zones polliniques locales sont décrites dans l'annexe n° 4.

1.3. LES ANALYSES PONCTUELLES DU FORAGE LLC2

Seuls quelques échantillons ont été traités afin de replacer les changements de faciès dans une cadre paléoenvironnemental local établi à partir des deux précédents forages. Les résultats sont présentés dans la figure 2.15, sous la forme d'histogrammes car le pas d'échantillonnage est très lâche. Le diagramme présenté, permet de distinguer 3 zones polliniques décrites en annexe n°6. Les descriptions lithologiques du forage LLC2 sont en annexe n° 5.

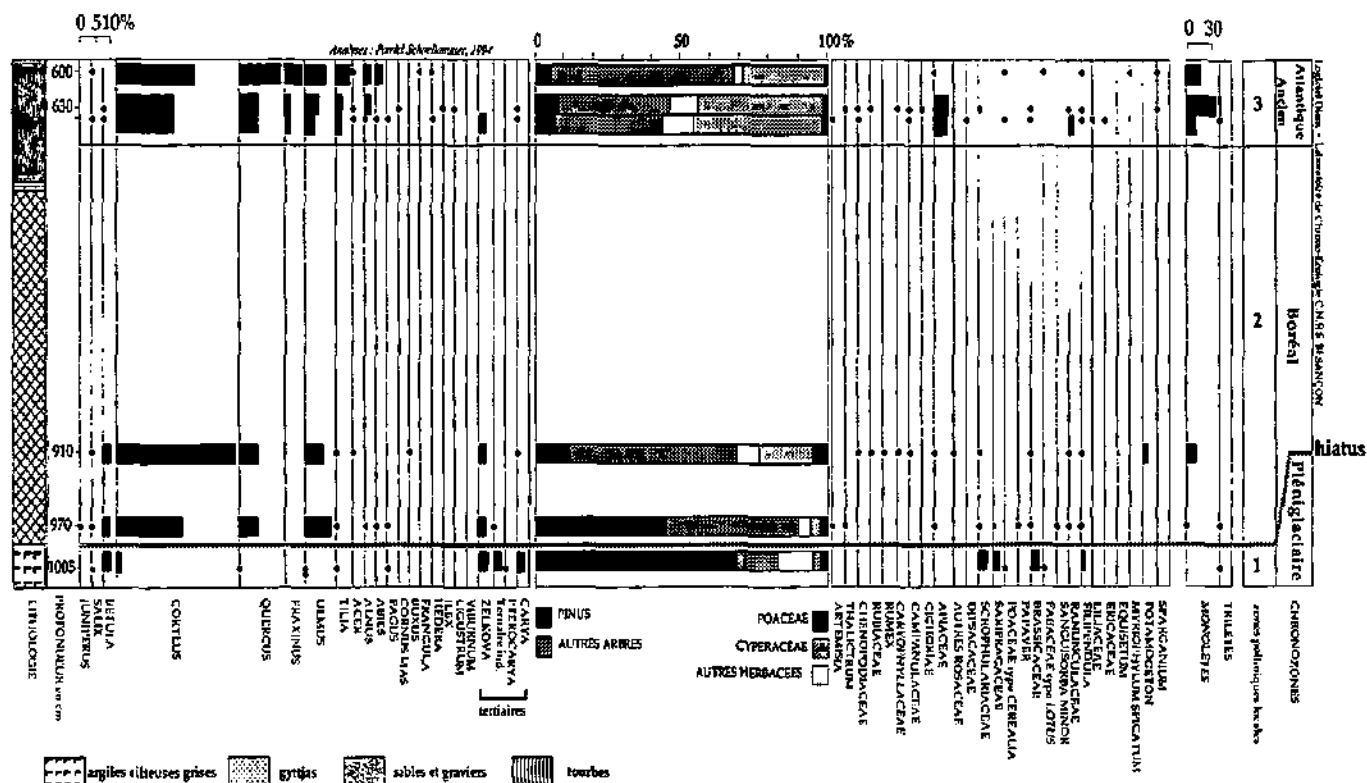


Figure 2.15 : Analyses polliniques ponctuelles du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

1.4. COMPARAISONS DES ZONES POLLINIQUES LOCALES DES TROIS FORAGES

La figure 2.16 montre les correspondances existant entre les zones polliniques locales définies dans les trois forages. Bien que relativement contrastées les zones polliniques locales identifiées dans ces trois forages relatent nécessairement une histoire commune de la végétation dont l'expression varie d'un forage à un autre.

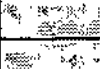
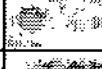
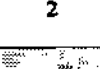
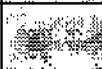
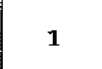
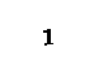
Datation ¹⁴ C (B.P.)	LLC1-2/5	LLC1	LLC2	Assemblages polliniques	CHRONOZONES
1745 ± 50 acceptable	17	10		zone à <i>Picea, Abies, Carpinus, Juglans</i>	SUBATLANTIQUE
2375 ± 55 acceptable				zone à <i>Fagus, Picea, Carpinus</i>	
2525 ± 55 acceptable	16	9		zone à <i>Abies, Picea, Fagus</i>	2700 B. P.
4315 ± 75 acceptable	15	8		zone à <i>Abies et Fagus</i>	SUBBORÉAL
5125 ± 65 acceptable	14	7		zone à <i>Fraxinus Abies et Fagus</i>	4700 B. P.
6280 ± 65 acceptable	13			zone à <i>Fraxinus, Ulmus Corylus et Quercus</i>	ATLANTIQUE récent
	12			zone à <i>Corylus et Quercetum-Mixtum</i>	--- 6000 B. P.
7210 ± 85 acceptable	11	6	3	zone à <i>Corylus, Ulmus et Quercus</i>	ATLANTIQUE ancien
8725 ± 80 vieilles	10	5		zone à <i>Pinus, Corylus</i>	8000 B. P.
9120 ± 75 vieilles	9	4	2	zone à <i>Pinus, Betula, Poaceae</i>	BORÉAL
	8			zone à <i>Pinus, Betula, Poaceae</i>	
9745 ± 80 vieilles	7	3		zone à <i>Pinus, Betula, Poaceae</i>	PRÉBORÉAL
	6	2		zone à <i>Pinus, Betula, Poaceae</i>	
	5			zone à <i>Pinus</i>	
	4			zone à <i>Pinus, Betula, Poaceae</i>	
	3			zone à <i>Juniperus, Cyperaceae</i>	10 000 B. P.
	2			zone à <i>Juniperus, Betula...</i>	
	1			zone à <i>Pinus, Artemisia, Betula...</i>	
20680 ± 230 incertaine		1	1	zone à <i>Pinus, Artemisia</i>	HIATUS
13760 ± 120 incertaine					PLÉNIGLACIAIRE
15680 ± 140 incertaine					

Figure 2.16 : Comparaison des zones polliniques locales identifiées après analyse pollinique des trois forages du Locle

Les aires grisées mettent en évidence les hiatus et le manque d'informations liés aux conditions de prélèvement du forage LLC 1 (carottier à piston). Les zones polliniques locales 2 à 5 du forage LLC 1-2 à 5 n'ont pas d'équivalence dans le forage LLC 1. Cette constatation est également valable pour les zones 8, 12 et 13 du forage LLC 1-2 à 5. Les zones polliniques locales identifiées sur le forage LLC 2 renvoient, sommairement il est vrai, à des zones définies plus en détail dans les forages LLC 1.

1.5. ZONES POLLINIQUES LOCALES ET CONCENTRATIONS ABSOLUES

1.5.1. Introduction

Plusieurs auteurs ont souligné l'importance de la méthode des concentrations absolues (Cour, 1974 ; Gaillard, 1984 a ; Ruffaldi, 1993). Pennington et Sackin (1975) en montrent la nécessité pour l'interprétation des diagrammes polliniques du Tardiglaciaire. Pour ces auteurs, les flux polliniques varieraient peu au cours de l'Holocène ; les pourcentages relatifs suffiraient à l'interprétation des diagrammes.

Les variations enregistrées dans les concentrations absolues totales peuvent-être dues à plusieurs causes (Gaillard, 1984 a) :

- à la nature du dépôt ;
- à un changement dans la vitesse de sédimentation ;
- à l'apparition ou la disparition d'un fort producteur pollinique ;
- à une modification de la densité ou de la structure de la végétation.

Les sédiments les plus profondément prélevés dans les remplissages lacustres correspondent souvent à des argiles sableuses, parfois très riches en graviers (cf : annexes 3 et 5). Les concentrations polliniques absolues y sont extrêmement faibles et variables. Ces dépôts sont vraisemblablement issus d'une accumulation très rapide et discontinue. Le transport de l'importante quantité de matériaux déposée par des eaux torrentielles est favorisée par l'existence d'une végétation arbustive et herbacée réduite. La combinaison d'une végétation peu développée et d'une vitesse de sédimentation élevée serait à l'origine des faibles concentrations absolues (Gaillard, 1984 a, b). Mais un effet climatique n'est jamais à exclure : un changement de régime hydrologique pourrait réduire la charge sédimentaire entraînant une baisse de la vitesse de sédimentation. Des datations absolues par le radiocarbone effectuées avec un pas serré d'échantillonnage permettent d'appréhender les vitesses de sédimentation. A l'opposé des concentrations polliniques élevées dans les argiles suggèrent la présence de communautés végétales plus denses.

L'analyse des concentrations absolues a été effectuée sur tous les sédiments traités pour cette étude. Seuls sont présentés de manière détaillée les résultats pour le Pléniglaciaire (forage LLC 1, figure 2.17, annexes n° 9 et 10), et pour l'Holocène (forage LLC 1-2 à 5, figure 2.18, annexes n° 11 et 12). Toutes les zones polliniques mises en évidence par les comptages relatifs, ainsi que la plupart de leurs caractéristiques ont été confirmées par les valeurs absolues.

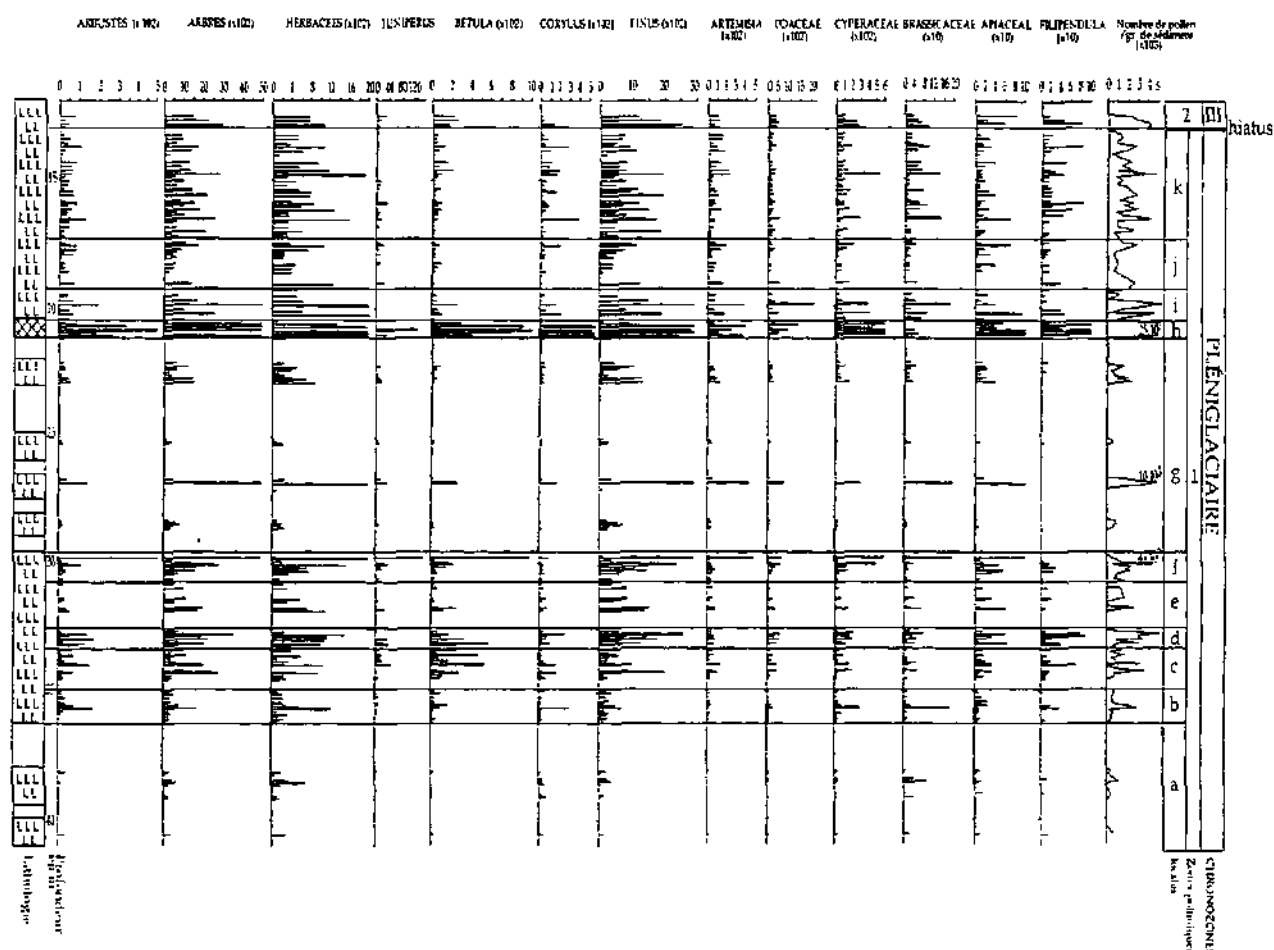


Figure 2.17 : Concentrations polliniques absolues des sédiments pléniglaciaires du Locle

1.5.2. Résultats, Synthèse

L'interprétation des concentrations absolues représentée sous forme d'histogrammes fournit des informations supplémentaires sur les changements qui ont affecté le couvert végétal.

Il apparaît tout d'abord une nette fluctuation des F.P.A. en relation avec la nature des sédiments (argiles, craies, gyttjas, tourbes) et les vitesses de sédimentation, du Pléniglaciaire jusqu'à la période sub-actuelle. Manifestement ces variations ne peuvent être attribuées exclusivement aux seules influences climatiques.

Pendant le Pléniglaciaire, l'existence d'une couverture végétale médiocre, morcelée, est en partie reflétée par des F.P.A. faibles mais supérieures à celles observées par ailleurs dans d'autres régions (Andrieu, 1989, 1991 ; Ruffaldi, 1993, 1996 ; Fauquette, 1995).

Au cours de l'Holocène, sur le site du Locle, les variations des F.P.A. ne semblent pas être indépendantes du type de faciès sédimentaire dans lequel les pollens sont conservés contrairement à ce qui a pu être observé par d'autres auteurs. Les plus fortes productions polliniques ne correspondent pas, au cours de l'Holocène, aux fortes productions de *Pinus* et *Corylus* (zones 12, gyttjas et zone 15, tourbes fibreuses du forage LLC 1-2 à 5). Les faibles

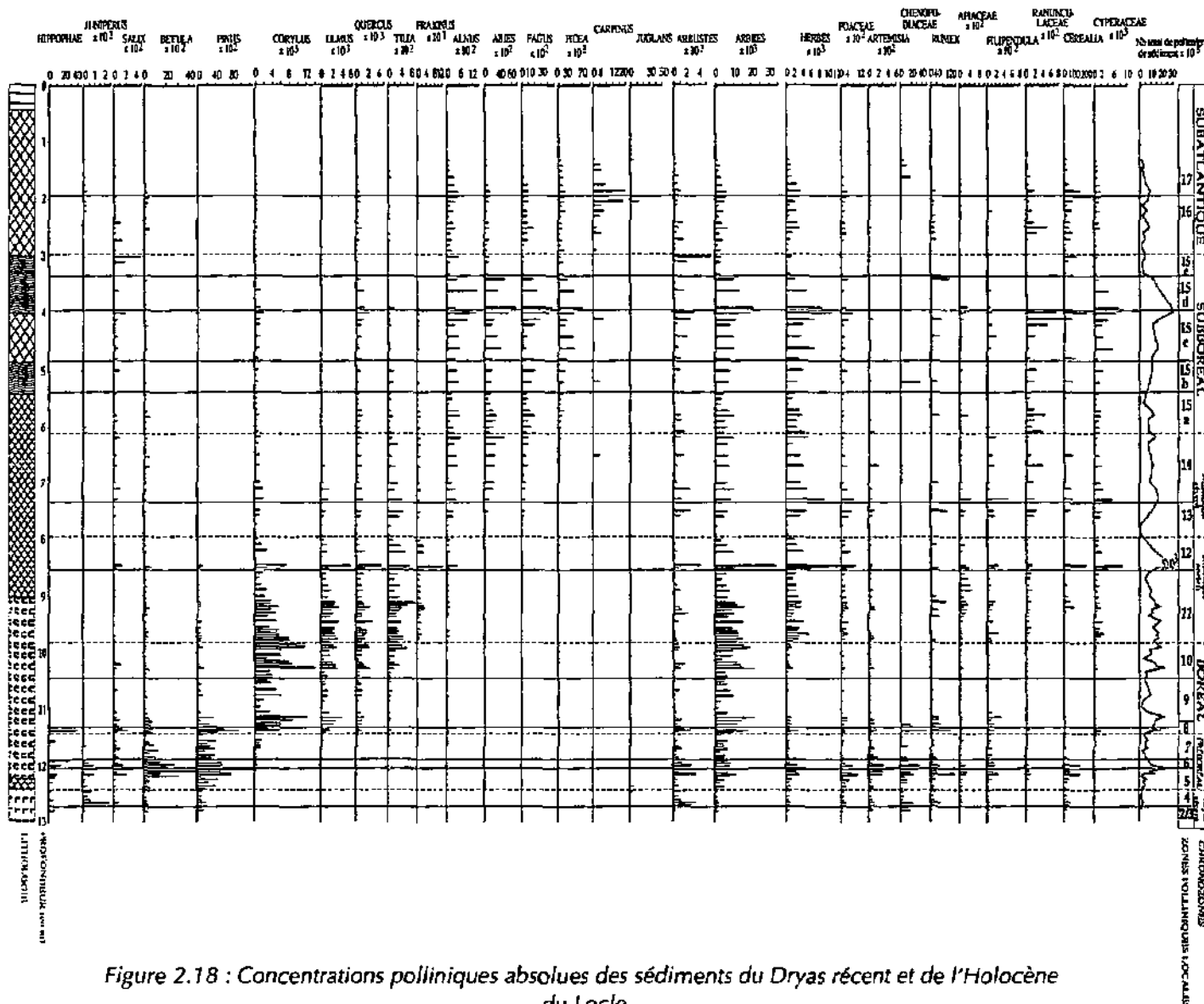


Figure 2.18 : Concentrations polliniques absolues des sédiments du Dryas récent et de l'Holocène du Locle

concentrations polliniques des sédiments sommitaux coïncident avec les tourbes où les pollens y sont souvent mal conservés. Il est probable que l'exondation des tourbes due au drainage, fruit de l'activité humaine, conditionne fortement la baisse des F.P.A.

Enfin, les concentrations absolues permettent de préciser la limite entre le Préboréal et le Boréal. En effet, dans la zone 8 du forage LLC 1-2 à 5, les pourcentages de *Pinus* sont encore très élevés par rapport à la hausse de *Corylus*. Les F.P.A. font apparaître en réalité que dans cette zone pollinique le nombre des grains de *Pinus* a chuté alors que celui de *Corylus* est déjà très important.

1.6. HISTOIRE DE LA VÉGÉTATION SUR LE SITE DU LOCLE

Les descriptions des zones polliniques locales n'ont d'intérêt que si l'on peut les corréler avec celles des régions limitrophes et que si elles sont calées chronologiquement. A partir des informations obtenues sur l'histoire de la végétation dans cette partie du Jura (Spinner, 1926 a, b ; 1927 a, b, c ; 1929 ; Matthey, 1971 ; Campy *et al.*, 1985 ; Cupillard *et al.*, 1994) ces zones polliniques locales ont pu être comparées à toutes ces données.

De plus, les datations ^{14}C permettent de replacer, dans le cadre de la chronologie dite "européenne" (Beaulieu de, Reille, 1983), les changements du contenu pollinique des sédiments du Locle. 13 dates ont été effectuées sur les niveaux organiques du forage LLC1 du Locle, les mesures ont été faites en partie par le Laboratoire de Radiocarbone d'Oxford via Lyon et par l'École Polytechnique Fédérale de Zürich. Toutes ces dates radiocarbone sont présentées dans la figure 2.19 et 2.20. La nature du matériel mesuré, la profondeur des prélèvements dans le forage et les âges attendus sont rassemblés dans le tableau 2.20. Toutes ces datations viennent compléter celles qui sont déjà disponibles dans le Jura et le Plateau suisse (Wegmüller, 1966 ; Matthey, 1971 ; Richard, 1983 ; Ammann *et al.*, 1983 ; Gaillard, 1984 a, b ; Ammann, Lotter, 1989 ; Lotter, Zbinden, 1989 ; Ammann, 1985, 1989 a et b ; Lotter *et al.*, 1992 a, b, c ; Rachoud-Schneider, 1993 ; Ruffaldi, 1993 ; Beaulieu de *et al.*, 1994) figure 2.19.

1.6.1. Le Pléniglaciaire (zone pollinique locale à *Pinus* entre 13 et 41 m) : la période fini-würmienne

La prédominance de *Pinus* associée aux *Poaceae* et à de rares herbacées héliophiles steppiques (*Helianthemum*, *Artemisia*, *Plantago*) caractérise la zone pollinique 1. Quelques arbres ayant des exigences écologiques très différentes (*Abies*, *Fagus*, *Picea*) sont également rencontrés. Des pollens de *Juglandaceae* (*Carya*, *Pterocarya*, *Platycarya*), mais également de *Taxodiaceae* (*Tsuga*), d'*Ulmaceae* (*Zelkova*), d'origine tertiaire se trouvent mêlés à des taxons quaternaires. Des analyses effectuées dans des niveaux majeurs de l'Oehningien montrent la présence de plusieurs de ces taxons y compris celle de taxons qui existent encore actuellement : *Tilia*, *Alnus*, *Abies*, *Pinus*, *Quercus*. Le résultat de ces analyses corrobore les observations faites sur la présence de remaniements de l'Oehningien dans le Marais (Favre, 1911 ; Favre *et al.*, 1937).

Les spectres polliniques pléniglaciaires montrent une complexité certaine. Des taxons forestiers mésophiles (*Fagus*, *Picea*, *Quercus*), voire thermophiles (*Tilia*, *Acer*, *Buxus*), cohabitent en effet avec des taxons steppiques héliophiles, ceci est incompatible avec les assemblages polliniques des environnements glaciaires. Des spectres polliniques présentant un tel mélange sont interprétés comme étant le résultat d'importants remaniements sédimentaires (Sidler, 1984, 1985 ; Beaulieu de, Reille, 1984 a, b ; Andrieu, 1991 ; Reille, Andrieu, 1991 ; Ruffaldi, 1993). Par ailleurs, l'uniformité de cette zone pollinique 1 traduit bien une végétation régionale pauvre, liée à des conditions climatiques extrêmes. L'allure des courbes en dents de scie pourrait résulter des triages hydrodynamiques exercés sur la sédimentation et n'auraient donc pas de signification climatique (Sidler, 1984, 1985 ; Andrieu, 1989). Cette particularité des spectres pléniglaciaires est reconnue par différents auteurs (Andrieu, 1991 ; Reille, Andrieu, 1991 ; Beaulieu de, Reille, 1992 a, b ; Ruffaldi, 1993) qui signalent dans des dépôts du Pléniglaciaire Supérieur un amalgame de pollens d'origine lointaine ou régionale et de grains non contemporains des dépôts.

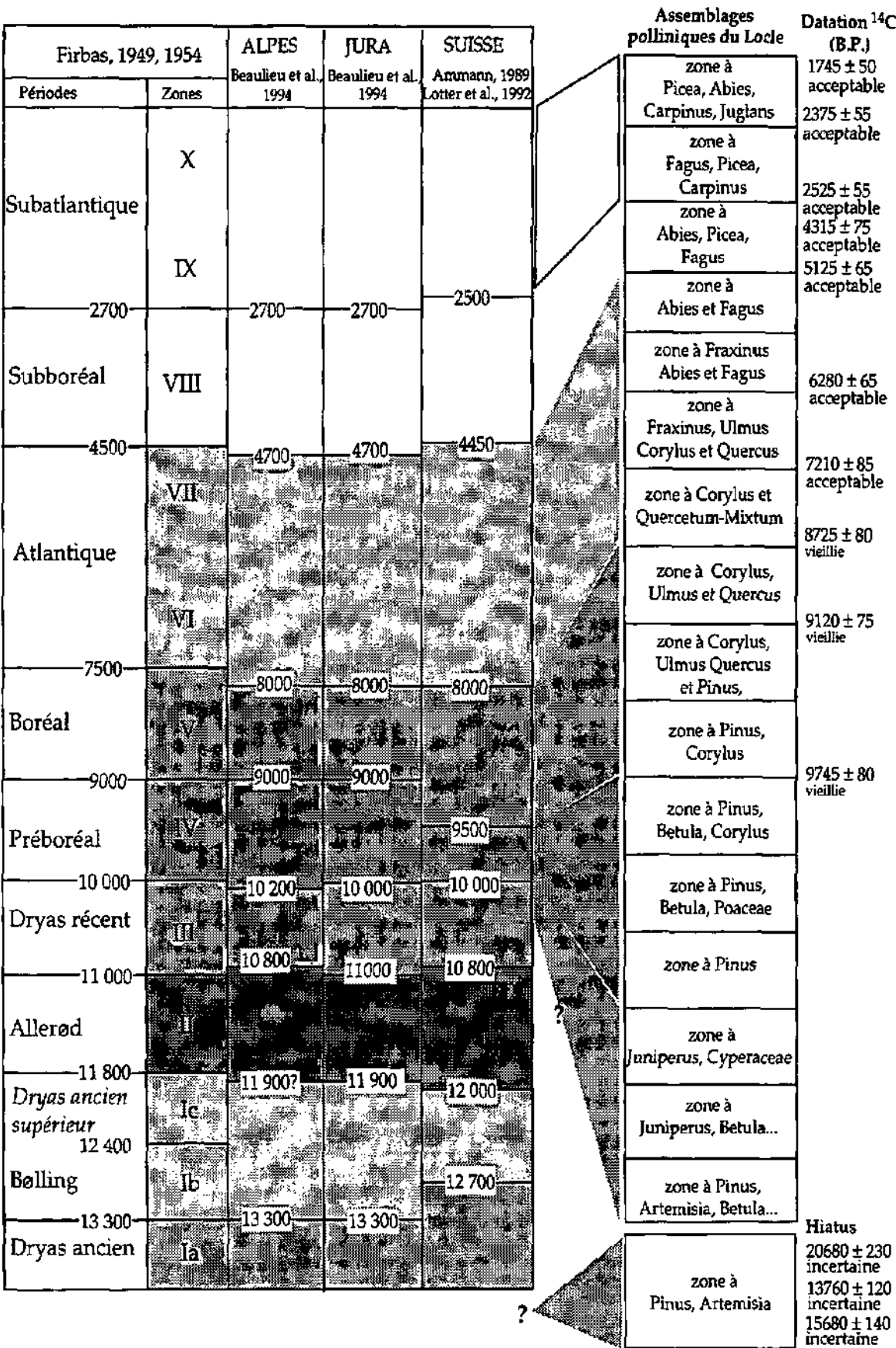


Figure 2.19 : Comparaison des zones polliniques locales définies au Locle avec la chronozonation admise dans la littérature régionale

1.6.1.1. Les problèmes méthodologiques rencontrés

Sidler (1984, 1985) a rencontré, dans l'analyse pollinique des sédiments du lac de Zürich, des difficultés comparables à celles rencontrées au Locle. Dans des sédiments d'âge anté Holocène, les conifères dominent mais les feuillus n'atteignent pas des pourcentages aussi élevés qu'au Locle. Pour cet auteur, la présence inattendue de palynomorphes pré-quaternaires témoigne indubitablement d'apports détritiques très anciens (Molasse marine et Helvétien) conduisant à reconnaître l'incompatibilité des associations polliniques. Lorsque les associations de conifères et de feuillus sont dominées par les herbacées et les arbustes, elles indiqueraient plutôt une végétation autochtone alors que les autres assemblages traduiraient des remaniements sédimentaires.

Selon Sidler (*loc. cit.*), la possibilité de discriminer l'origine tertiaire ou quaternaire peut être hasardeuse *"Sur la base de l'observation de l'état de conservation des pollens ainsi que sur la coloration, il n'a pas été possible d'opérer une distinction entre les grains éventuellement autochtones et les grains remaniés car les conifères prennent bien la coloration sauf les tertiaires et les secondaires."* Au Locle, le même problème s'est posé. Si les pollens de pin (pré-quaternaire et quaternaire) ont pu être reconnus, aucune distinction n'a pu être faite sur l'origine des autres taxons (*Tilia*, *Alnus*, *Quercus*, les herbacées).

1.6.1.2. Comment proposer un âge absolu à ces sédiments ?

Pour replacer les caractéristiques de cette végétation dans le cadre de l'évolution de la végétation régionale, il est nécessaire d'envisager une hypothèse. Cette hypothèse prend en compte les incertitudes quant à l'étendue de la dernière glaciation dans cette partie de la chaîne jurassienne d'une part et l'imprécision des datations radiocarbone effectuées d'autre part. De plus, de tels spectres n'ont pas encore été décrits dans cette partie du Jura et dans les régions limitrophes.

Les travaux portant sur les dépôts glaciaires de la région locloise sont peu nombreux et donnent des arguments souvent contradictoires (cf. partie 1, § 2.1.2.2). Actuellement il n'est pas permis de privilégier un point de vue plutôt qu'un autre sans avoir engagé une étude régionale de l'ensemble des dépôts glaciaires rissiens et/ou würmiens compte tenu des conditions difficiles d'observation sur le terrain. Ce n'est qu'au prix d'un important travail de cartographie et d'analyses sédimentologiques que les conditions dans lesquelles ces dépôts se sont mis en place pourront être précisées.

Ces réserves posées, il est cependant possible d'envisager (cf. § 2.1.2.2) qu'une langue glaciaire ait atteint la dépression du Locle au maximum du développement du glacier würmien. Dans cette hypothèse, les datations de la zone pollinique locale 1 du Locle posent problèmes :

- les mesures ^{14}C sont incohérentes avec la position stratigraphique des échantillons datés ;

- les trois dates ^{14}C sont certainement vieilles par la matière organique plus ancienne (tertiaire) dans le cas présent, comme elles le sont en grande partie pour l'Holocène

au Locle (cf figure 2.19 et 2.20). Dans la littérature, il est régulièrement fait mention que les mesures radiométriques sont systématiquement vieillies dans les périodes qui précèdent l'Holocène (Reille, Andrieu, 1991 ; Ammann, 1989 a, b, c). Si les sédiments étaient d'âge antérieurs au Würm, les dates devraient être nettement plus anciennes. Par exemple, le dernier interglaciaire (Éémien) s'est achevé il y a environ 125 000 ans. Pendant cette période, une dynamique végétale proche de celle de l'Holocène s'y est développée (Beaulieu de, Reille, 1984 a, b ; 1985 ; 1989 ; 1992 a, b ; Reille, Beaulieu de, 1988 a, b ; Woillard, 1975, 1982). Au Locle, aucune caractéristique de cet interglaciaire n'est visible ; l'attribution de ces dépôts à la déglaciation würmienne est permise *de facto*.

- Les spectres polliniques attribués à la fin du Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire n'ont pas (ou peu) de points communs avec les zones polliniques décrites aux mêmes périodes sur d'autres sites du Jura, du Plateau Suisse, des Vosges Saônoises et du Massif Central (Woillard, 1975 ; Welten, 1982, 1988 ; Beaulieu de, Reille, 1984 a et b, 1989 ; Sidler 1984, 1985 ; Reille, Beaulieu de, 1988 a, b ; Reille, Beaulieu de, 1990 ; Pugin *et al.*, 1993 etc...). La plupart des études concernant le Pléniglaciaire final dans les régions limitrophes (Campy, Richard, 1988 sur les sites suivants : Les Cruilles, les lacs de Maclu et de Chalain), les Échets (Beaulieu de, Reille, 1984 a, b ; 1986), le lac de Cerin (Ruffaldi, 1993, 1996) aboutissent à une définition précise des caractéristiques polliniques de cette période qui ne sont pas retrouvées en totalité au Locle.

Les sédiments argileux du Col-des-Roches se sont donc déposés entre le début de la libération de cette cuvette par le glacier würmien et le début du Tardiglaciaire. Actuellement, il n'est pas possible de savoir si la mise en place de ces sédiments a été continue ; elle a dû être très rapide. Le réseau karstique, qui jusque là drainait le matériel érodé en direction de la vallée du Doubs (Burger, Schaer, 1996), a été rapidement colmaté par les glissements des niveaux marneux Oeningien au moment du retrait du glacier würmien permettant ainsi l'installation du lac quaternaire.

1.6.2. Lacune de la majorité du Tardiglaciaire

Les associations polliniques caractéristiques du Tardiglaciaire sont presque en totalité absentes sur le site du Locle. Cette lacune comprend le Dryas ancien, l'interstade Bølling-Allerød et une grande partie du Dryas récent. Il n'est pas possible de suivre, par exemple, la progression d'*Artemisia* marquant "l'événement 15000 B. P." (Andrieu, Eicher, Reille, 1993 ; Beaulieu de *et al.*, 1994).

Dans le Jura, le principal critère d'identification du Dryas ancien (entre env. 15 000 BP - 13 300 BP) est l'expansion des espèces steppiques comme *Artemisia*, *Helianthemum*, *Thalictrum*... *Helianthemum* et *Thalictrum* sont nettement plus représentés vers la fin de cette chronozone qu'au début de celle-ci (Beaulieu de *et al.*, 1994). Les modifications des communautés végétales résultent d'un changement de conditions climatiques intervenant à la transition Pléniglaciaire - Dryas ancien. La très grande pauvreté en pollen des sédiments de cette période (argiles) est connue dans de nombreux sites (Küttel, 1977 ; Richard, 1983 ; Gaillard, 1984 a, b ; Ammann, 1989 a, b, c ; Andrieu, 1991 ; Lotter *et al.*, 1992 a, b, c ; Ruffaldi 1993 ...). La pauvreté du contenu pollinique du Dryas ancien n'est liée ni au type sédimentaire, ni à un type de conservation pollinique particulière, mais serait plutôt le reflet d'une végétation clairsemée. Ce caractère pourrait expliquer les variations aléatoires de la

Sondage	Profondeur en cm	Type de sédiment	Laboratoire et N° de comptage	Age Radiocarbone (BP)	Intervalle de temps de l'Age Calibré cal. BC	Zone pollinique locale	Chronozones (d'après zones polliniques locales)	Indications de la date	Commentaire sur la validité des dates
LLC1-2	141-143	tourbe	Ly-101	1745±50	147 (175, 197) 419 cal. AD	Zone à <i>Picea</i> , <i>Abies</i> , <i>Carpinus</i> et <i>Juglans</i>	Subatlantique	Subatlantique	Acceptable
LLC1-2	197-200	gyttja/craie	Ly-102	2375±55	758 (681, 544) 370	Zone à <i>Picea</i> , <i>Abies</i> , <i>Carpinus</i> et <i>Juglans</i>	Subatlantique	Subatlantique	Acceptable
LLC1-2	280-282	tourbe	Ly-103	2525±55	805 (767) 409	zone à <i>Fagus</i> , <i>Picea</i> et <i>Carpinus</i>	Subatlantique	Subatlantique	Acceptable
LLC1-2	405-408	tourbe	Ly-104	4315±75	3251 (3919) 2698	Zone à <i>Abies</i> , <i>Picea</i> et <i>Fagus</i>	Subboréal	Subboréal	Acceptable
LLC1-2	634-635	tourbe	Ly-105	5125±67	4040 (3956) 3779	zone à <i>Abies</i> et <i>Fagus</i>	Subboréal / Atlantique récent	Atlantique récent	Acceptable
LLC1-2	788-790	tourbe	Ly-106	6280±65	5329 (5346) 5062	zone à <i>Quercetum-mixtum</i> et <i>Abies</i>	Atlantique récent / Atlantique ancien	Atlantique ancien	Acceptable
LLC1-2	845-847	tourbe	Ly-107	7210±85	6187 (6008) 5881	zone à <i>Fraxinus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Corylus</i> et <i>Quercus</i>	Atlantique ancien	Atlantique ancien	Acceptable
LLC1-4	967-968	gyttja/tourbe	Ly-108	8725±80	7963 (7850, 7822, 7703) 7541	zone à <i>Corylus</i> et <i>Quercetum-mixtum</i>	Boréal / Atlantique ancien	Boréal	Rejetée car vieillie
LLC1-4	1031-1032	craie et matière organique	Ly-109	9120±75	8340 (8088) 8010	zone à <i>Corylus</i> , <i>Ulmus</i> et <i>Quercus</i>	Boréal	Préboréal	Rejetée car vieillie
LLC1-4	1137-1138	craie et matière organique	Ly-110	9745±80	9059 (9016) 8625	zone à <i>Pinus</i> et <i>Corylus</i>	Préboréal / Boréal	Préboréal	Rejetée car vieillie
LLC1	2039-2045	gyttja	UZ-3564 ETH-11.647	20680±230	.	zone à <i>Pinus</i>	Pléniglaciaire	Pléniglaciaire	incertaine
LLC1	3028-3038	niveau organique	UZ-3565 ETH-11.116	13760±120	14892-14188	zone à <i>Pinus</i>	Pléniglaciaire	Dryas ancien	incertaine
LLC1	3864-3868	niveau organique	UZ-3566 ETH-11.117	15580±140	16850-16221	zone à <i>Pinus</i>	Pléniglaciaire	Pléniglaciaire	incertaine

Les calibrations ont été réalisées avec le logiciel CALIB ver 3.0.3. A mise à jour du 07/01/1994 de Mince Stuiver et Paula J. Reimer. Quaternary Research Center AK-60, University of Washington

Figure 2.20. : Tableau des datations ¹⁴C effectuées dans les sédiments du Locle

pluie pollinique (Beaulieu de, Reille, 1983). Toutes ces caractéristiques n'ont pas été relevées sur ce site.

Dans les remplissages voisins de celui du Col-des-Roches (Ponts-de-Martel, La Brévine, Les Brenets), des assemblages polliniques attribués à l'interstade Bølling-Allerød (entre 13 300 et 11 000 BP en cf figure 2.19) faisant suite à ceux du Dryas ancien, sont décrits. Ces assemblages montrent une très nette réduction des herbacées steppiques pour laisser place à un nouveau tapis non arboréen. Celui-ci comprend maintenant *Filipendula*, *Rumex*, des *Apiaceae* et des *Cyperaceae* (Ammann, 1989 a, b ; Gaillard, Moulin, 1989). Dans la plupart des sites où est identifiée cette chronozone, l'enregistrement est extrêmement réduit (Beaulieu de et al., 1994). L'essentiel des pollens arboréens est représenté par *Juniperus* et *Betula*. Ceux-ci peuvent apparaître dans deux phases distinctes, parallèlement peut se développer *Pinus*. Pour la première fois sont signalées les premières occurrences d'arbres mésophiles comme *Quercus* et *Fraxinus*. Ces phénomènes ne sont pas clairement identifiés au Locle. Ces changements de végétation sont calés entre 12 700 et 11 000 BP dans le Jura, entre 13 000 et 10 800 dans les Alpes.

Les assemblages polliniques caractéristiques de la période du Dryas récent (11 000 - 10 000 BP) dans le Jura se traduisent par une diminution des pourcentages de *Pinus* (par rapport à l'interstade Bølling/Allerød) et par une nette augmentation des pourcentages des herbacées steppiques comme *Artemisia*, *Helianthemum* et les chenopodiacées (Beaulieu de et al., 1994).

Seules les zones 2 et 3 du diagramme synthétique n° 2.14 (hors-texte) et la zone 2 des diagrammes n° 2.11, 2.12 et 2.13 (hors-texte) peuvent être attribuées au Dryas récent. Cette chronozone est enregistrée dans les argiles silteuses grises. Le taux d'*Artemisia* y est à peine plus important que dans la zone 1 (Pléniglaciaire) ; les *Chenopodiaceae* et les *Poaceae* sont en hausse alors que le taux des pollens arboréens descend relativement bas. Ces spectres polliniques sont attribuables à l'extrême fin du Dryas récent. Les descriptions de cette chronozone faites sur le Jura (Wegmüller, 1966 ; Matthey, 1971 ; Richard, 1983 ; Cupillard *et al.*, 1994 ; Beaulieu *et al.*, 1994) comme sur le plateau Suisse (Burga, 1988 ; Ammann, 1989 a, b, c ; Hadorn, 1992 et 1994) montrent des taux d'*Artemisia* et de *Poaceae* nettement plus importants.

L'étude géophysique montre que le forage principal a été fait en bordure de la zone la plus profonde de la cuvette. Cette position explique, en partie, que le remplissage a dû être perturbé par des phénomènes de "slumping" qui ont fait disparaître certaines parties de la sédimentation et fortement perturbé ces dépôts : lacunes sédimentaires, dépôts de matériaux plus anciens ou plus récents... Les 28 mètres de sédiment inférieurs ne peuvent donc pas être considérés comme un dépôt continu.

1.6.3. Le Préboréal (10 000 - 9000 BP) : Zone à *Pinus*, *Betula* et *Corylus* (zone 3 et 4 du forage LLC 1 et zones 5, 6, 7 des forages LLC 1-2 à 5)

La période Préboréal est plus documentée dans les forages LLC 1-2 à 5 que dans le forage LLC 1. Le début du remplissage contemporain de cette chronozone est constitué d'une gyttja plus ou moins argileuse intercalée entre les argiles silteuses et les craies lacustres. La documentation fournie par ce forage permet de scinder cette chronozone en trois épisodes distincts correspondant à trois zones polliniques locales. Cette tripartition a déjà été relevée dans le Jura à Onoz (Magny, Ruffaldi, 1995) et en Bresse à Le Miroir (Richard, 1996). Dans le Jura, le Préboréal est toujours bien marqué dans les diagrammes des sites géographiquement les plus proches : Sous Martel Dernier, Sur les Bieds, Noiraigue (Matthey, 1971) ; Mouthe, Remoray, Saint Point, Morteau/Montlebon (Campy *et al.*, 1985 ; Di Giovanni, 1994 ; Cupillard *et al.*, 1994 ; Magny, Ruffaldi, 1995).

L'expansion de *Betula* et de *Pinus*, avec des arbustes pionniers de type steppique (*Juniperus*, *Hippophae*), caractérise le Préboréal bien que le pourcentage de taxons herbacés continue de souligner la présence de milieux ouverts (Cupillard *et al.*, 1994). Les arbres mésophiles, *Quercus* puis *Ulmus* à un niveau moindre, sont présents depuis le début du Préboréal ; ces essences à feuillage caduc (*Corylus*, *Quercus*, *Ulmus*) sont reconnues et rendent compte de la progression régionale, à plus basse altitude, de ces taxons. Les pourcentages discrets de *Quercus* et *Ulmus* traduisent les débuts de la diffusion régionale de ces essences forestières. *Corylus* suit une progression comparable mais se développe très rapidement ; il atteint rapidement 20 %. A cette altitude, *Populus* n'a pas été identifié ; il ne peut donc pas être utilisé comme élément caractéristique de cette période (Gaillard, 1984 ; Ammann, 1989). Par contre *Filipendula* montre un développement témoignant le développement d'une mégaphorbiaie (*Apiaceae*, *Filipendula*...). La raréfaction des herbacées steppiques, comme *Artemisia*, *Helianthemum*, *Thalictrum*, révèle la présence de lambeaux steppiques dans les environs immédiats du site.

Le début du Préboréal est situé vers 10 000 BP dans le Jura (Beaulieu de *et al.*, 1994), 9980 ± 120 BP sur le Plateau Suisse (Ammann, 1989 a, b, c ; Lotter *et al.*, 1992 a, b, c). La fin de cette période se situe aux environs de 9000 BP (Beaulieu de *et al.*, 1994 ; Burga, 1988), au Locle, une date jugée trop vieille de 700 ans (9745 ± 80 BP soit [9059 (9016) 8625] cal. BC entre 1137 et 1138 cm de profondeur) devait caler la fin du Préboréal.

1.6.4. Le Boréal (9000 - 8000 BP) : Zone à *Corylus* et *Quercetum-Mixtum* (zones 5, 6 du forage LLC 1 et zones 8, 9, 10 des forages LLC 1-2 à 5)

Cette chronozone montre l'expansion et l'optimum de *Corylus* d'une part, et l'installation du *Quercetum-Mixtum* d'autre part. Ces deux étapes figurent sur les diagrammes n°2.13 et 2.14. Dans les forages LLC 1-2 à 5, la craie lacustre devient brusquement organique à 1045 cm et montre deux niveaux tourbeux qui sont bien repérés : l'un à 1137 cm, l'autre à 975 cm. La limite inférieure de cette chronozone est placée à l'intersection des courbes du pin (*Pinus*) et du noisetier (*Corylus*). Ici, l'étude des concentrations polliniques absolues a montré que ce passage Préboréal/Boréal s'effectuait avant cette intersection, entre les zones polliniques locales 7 et 8 (LLC 1-2 à 5) et non entre les zones polliniques locales 8 et 9.

Le développement des taxons mésothermophiles (*Corylus*, *Ulmus*, *Quercus*) et la disparition des derniers éléments de la végétation issus du Tardiglaciaire caractérisent cette période pendant laquelle le pin joue encore un rôle important (zones 8 puis 9). Une tripartition de cette période est possible. Elle est fonction de l'évolution de *Pinus* et *Corylus* (zone 8, séparée de la zone 9 par un niveau organique tourbeux à 1137 cm), de *Corylus*, *Ulmus* et *Quercus* (zone 9) et enfin de *Corylus*, *Ulmus* et *Tilia* (zone 10) lorsque la sédimentation devient organique. Les abords immédiats du site sont occupés par une mégaphorbiaie toujours dominée par les *Apiaceae*, les *Cyperaceae*, les *Ranunculaceae*, et *Filipendula*.

Les datations radiocarbone apportent peu d'informations supplémentaires (figure 2.19 et 2.20). La première date (9745 ± 80 BP soit [9059 (9016) 8625] cal. BC entre 1137 et 1138 cm) effectuée dans la zone 7, est d'après les données des régions limitrophes, vieillie (elle indique un âge qui se situe dans la seconde moitié du Préboréal). La seconde date faite entre 1031 et 1032 cm donne un âge de 9120 ± 75 BP [8340 (8088) 8010] cal. BC, les renseignements de cette datation ne sont pas en accord, une fois de plus avec l'événement daté. Elle indiquerait plutôt la limite Préboréal-Boréal. La troisième date, réalisée à 975 cm de profondeur à la transition Boréal-Atlantique ancien donne un âge de 8725 ± 80 BP soit [7963 (7850, 7822, 7703) 7541] cal. BC renvoyant à un épisode de la seconde moitié du Boréal. La limite Boréal/Atlantique ancien est placée sur la figure 2.13 entre les zones 9 et 10. Le comportement de *Corylus* et l'apparition soudaine de *Fraxinus* en courbe continue avec des valeurs supérieures à 5 %) suggère de plus un hiatus sédimentaire.

1.6.5. L'Atlantique (8000 - 4700 BP) : zone à *Quercetum-Mixtum* et *Corylus* (zone 7 du forage LLC1 et zones 11, 12, 13 et 14 du forage LLC1-2 à 5)

L'Atlantique est la chronozone propice au développement de la Chênaie-Mixte (*Quercetum-Mixtum*) composée de chêne, de tilleul, d'orme, de frêne et d'érable. Cette chronozone est reconnue dans les forages du Marais (LLC1, LLC1-3 et 4) dans un sédiment

organo-craieux brun, proche d'une craie brune. Les teneurs en carbonates y sont importantes (65 à 70 %) ; le pourcentage de matière organique est de l'ordre de 2 à 6%. Des niveaux tourbeux s'y intercalent, comme c'est le cas par exemple à 9.75 m. Le changement de végétation très net accompagnant cette différence de sédimentation est interprété comme un hiatus sédimentaire.

1.6.5.1. L'Atlantique ancien (8000 - 6000 BP) zones 11 et 12 (LLC1-5)

La présence toujours élevée de *Corylus* donne à cette chronozone un aspect particulier déjà relevé dans les diagrammes des sites voisins : Sur les biefs, Le Cachot, Noiraigue (Matthey, 1971) ; les Franches Montagnes (Reille, 1991) ; Morteau/Montlebon etc... (Cupillard *et al.*, 1994). Les essences mésothermophiles ne paraissent pas tenir une place importante dans le paysage comme c'est vraisemblablement le cas à plus basse altitude (Richoz, Gaillard, 1989 ; Hadorn, 1992, 1994 ; Rachoud-Schneider, 1993 ; Richoz *et al.*, 1994). Très rapidement, *Fraxinus* se développe alors qu'il était presque absent au Boréal ; il atteint son optimum dans la zone 12 puis régresse très rapidement à la fin de l'Atlantique ancien. Le couvert forestier semble donc se transformer radicalement, acquérant un caractère plus thermophile. *Acer* dépasse à plusieurs reprises la barre des 1 % ; *Tilia* montre ses fréquences les plus élevées et se stabilise entre 2 et 5 % ; *Corylus* régresse mais participe encore activement à l'élaboration de la végétation régionale. La présence d'*Hedera* a valeur d'indicateur thermophile dès le Boréal ; elle souligne l'existence de températures plus élevées qu'auparavant (Wegmüller, 1966 ; Gaillard, 1984 a, b). Toutefois, les faibles valeurs (inférieures à 1 %) paraissent indiquer des conditions climatiques plus rudes que sur le plateau suisse.

Au milieu de cette période, les *Poaceae* de type *Cerealia* sont de nouveau plus fréquents mais ne sont accompagnés que par les plantains et les urticacées. Cette association pollinique n'est pas suffisante pour que soit perçue à travers elle une véritable action humaine sur la végétation. Souvent, les indices d'anthropisation décrits contiennent *Plantago major/media*, *Plantago lanceolata*, les *Chenopodiaceae*, les *Urticaceae*... (Ruffaldi, 1993 ; Richard, 1993 ; Richard, 1994). Dès le Pléniglaciaire et le début de l'Holocène (cf § 1.2.1) des pollens de *Poaceae* de grosse taille, de type *Cerealia*, étaient reconnus dans les spectres polliniques mais il n'étaient pas accompagnés des marqueurs cités ci-dessus. Dans ce cas, ils ne peuvent pas être attribués à des céréales *stricto sensu*, mais plutôt à des graminées sauvages à gros pollens.

L'apparition de *Fraxinus* coïncidant avec le retrait de *Corylus* a servi de repère pour placer la limite Boréal / Atlantique. La date 6280 ± 65 BP [5329 (5246) 5062] cal. BC effectuée à la fin de la zone 12, correspond au début de la présence continue d'*Abies* et permet de caler chronologiquement la limite entre l'Atlantique ancien et l'Atlantique récent au Locle. Cette date est en accord avec les données d'autres sites où l'essor d'*Abies* a lieu vers 5590 ± 200 BP soit [4902 (4453, 4416, 4402) 3981] cal. BC au Creux du Croue, vers 5560 ± 120 BP soit [4687 (4432, 4429, 4363) 4105] cal. BC et vers 6350 ± 120 BP soit [5477 (5274) 5003] cal. BC aux Amburnex (Wegmüller, 1966). A Cerin, la fin de l'Atlantique ancien est fixée à 6120 ± 90 BP [5257 (5051) 4806] cal. BC.

La seconde date 7210 ± 65 BP [6183 (6008) 5869] cal. BC permet de caler la phase à *Fraxinus* de ce site entre 7210 ± 65 et 6280 ± 65 BP.

1.6.5.2. L'Atlantique récent (6000 - 4700) zones 13 et 14 (LLC1-5)

Le début de l'Atlantique récent est marqué par l'installation et l'essor d'*Abies*, puis de *Fagus*. *Fraxinus* a retrouvé des valeurs proches de 5 à 10 %. La proportion des pollens d'*Alnus* est accrue dès le début de l'Atlantique récent. Le début de cette chronozone voit apparaître les premiers indices polliniques sûrs de l'action de l'homme sur le couvert végétal (Cupillard *et al.*, 1994). La part des *Cyperaceae* dans la végétation bordant le lac est importante, de même que *Sparganium*, *Nymphaea*, *Typha* qui doivent développer des ceintures au niveau du plan d'eau. *Hedera* est reconnu que dans la première partie de cette chronozone, ce qui souligne soit une légère baisse des températures, soit un ombrage renforcé consécutivement à l'installation d'*Abies* (Gaillard, 1984 a, b).

La limite entre l'Atlantique récent et le Subboréal est datée au Locle de 5125 ± 65 BP [4040 (3956) 3779] cal. BC. ; c'est à cette époque que s'installe *Picea*. Dans la vallée du Doubs, sur le site de Pré Mourey le début de la courbe de *Picea* est daté aux environs de 5410 ± 110 BP soit [4462 (4315, 4298, 4254) 3981] cal. BC (Cupillard *et al.*, 1994), et de 5240 ± 75 BP soit [4244 (4035, 4020, 4002) 3822] cal. BC sur le site du Couchant (Schoellammer, 1992, 1995).

1.6.6. Le Subboréal (env. 4700 - 2700 BP) : zone à *Abies* et *Fagus* (zones 8, 9 du forage LLC1 et zones 15 du forage LLC1-2 à 5)

Au Subboréal, la sédimentation est comparable à celle de l'Atlantique mais avec des passées tourbeuses plus fréquentes. La limite Atlantique récent /Subboréal a été placée dans les deux profils lorsque la courbe de *Picea* passe au dessus de 5 %. A ce passage on observe également une chute des pourcentages d'*Abies* et de *Fagus*, de *Tilia* et d'*Ulmus*.

Cette période voit l'installation et le développement de *Picea* parallèlement à celui de la hêtraie-sapinière. A l'opposé, les représentants de la chênaie-mixte sont en constante régression (*Fraxinus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Acer*) mais d'autres essences comme le chêne, l'aulne et le noisetier sont régulièrement représentées au cours de cette chronozone. *Carpinus* fait deux brèves apparitions pendant le Subboréal. La végétation bordant le site est diversifiée : les plantes aquatiques, les hygrophiles (très bien représentées) traduisent la présence de prairies humides relativement proches du site.

Les marques d'une action humaine sur le couvert végétal se retrouvent ponctuellement au cours de cette période. Les *Poaceae* de type *Cerealía* sont présentes de manière sporadique tout au long de la zone 15, mais n'apparaissent que dans la zone 8 du forage LLC 1. Les occurrences sont entrecoupées par des réapparitions d'*Artemisia*, *Poaceae* et *Cyperaceae* (zone 15 de LLC 1-5). La courbe des *Poaceae* de type *Cerealía* devient continue au sommet de cette période.

Au Locle, deux datations ^{14}C ont été faites pendant le Subboréal : l'une entre 634 et 635 cm donne 5125 ± 65 BP [4040 (3956) 3779] cal. BC., l'autre entre 405 et 408 cm donne 4315 ± 75 BP soit [3251 (2919) 2698] cal. BC. La première mesure radiométrique cale donc le passage entre l'Atlantique récent et le Subboréal. Sur le Plateau des Franches Montagnes, Reille (1991) a daté la première expansion de *Fagus*, associée à une dominance d'*Abies* et à la chute d'*Ulmus* de 4977 ± 179 BP soit [4223 (3771) 3363] cal. BC, et attribue cet événement au

passage Atlantique récent/Subboréal. Sur le site de Pré Mourey (Cupillard *et al.*, 1994) ces événements polliniques sont datés entre 4565 ± 50 [3495 (3344) 3095] cal. BC et 5410 ± 110 BP soit [4462 (4315, 4298, 4254) 3981] cal. BC. La date que nous proposons ici s'intègre parfaitement à ces données régionales. Rien ne laisse penser que la seconde datation est vieillie. Elle contribue à repérer chronologiquement un événement marquant de la hêtraie-sapinière. Les courbes de *Fagus* et de *Picea* montrent, aux environs de 4315 ± 75 BP soit [3251 (2919) 2698] cal. BC, des variations importantes. Ces événements coïncident avec la présence de pollens de *Poaceae* de type *Cerealia*.

1.6.7. Le Subatlantique (2700 BP- actuel) : (zones 15 et 16 LLC1-2 à 5 ; zones 9 et 10 LLC1) (Zone à *Picea*, *Carpinus*, *Juglans*)

La limite inférieure du Subatlantique a été placée par les premières apparitions de *Carpinus* (Wegmüller, 1966 ; Beaulieu *et al.* 1994) ; ces événements se situent vers 2525 ± 55 BP soit [805 (767) 409] cal. BC. Un sédiment à dominante tourbeuse a permis l'enregistrement de l'évolution environnementale de cette période (65 à 70 % de matière organique). L'influence de l'homme est grandissante et déterminante dans l'évolution de la végétation. La hêtraie-sapinière régresse fortement sous l'action anthropique. L'épicéa favorisé, se développe considérablement ; *Juglans* ne joue pas un rôle important en raison de l'altitude. Les céréales sont surtout représentées au début de cette période. *Carpinus* est probablement favorisé par ses propriétés de régénération après des coupes ou des éclaircissements.

Deux phases peuvent être différenciées :

- la première phase, (zones 16 LLC1-5 et zone 10 LLC1) durant laquelle un nouvel épisode d'origine anthropique est enregistré, se traduit par une chute brutale de la courbe de *Picea* et un recul léger d'*Abies*. A l'opposé, *Carpinus* apparaît en courbe presque continue. Des variations importantes dans les pourcentages de *Betula*, *Salix*, *Fraxinus* et *Juniperus*, corroborées par les concentrations absolues, suggèrent indirectement dans ce cas une reconquête d'espaces abandonnés. Par ailleurs, les *Poaceae* de type *Cerealia* dessinent une courbe irrégulière de même que *Plantago lanceolata*. La distribution de ces indices d'anthropisation atteste d'une alternance entre des périodes d'abandon de ces témoins et des périodes où l'élevage et les cultures semblent prédominer. Cette première phase du Subatlantique se situe en chronologie absolue entre 2525 ± 55 BP soit [805 (767) 409] cal. BC et 2375 ± 55 BP soit [758 (681, 544) 370] cal. BC.

- Dans la seconde phase, l'apparition de *Juglans* vers 2375 ± 75 BP soit [758 (681, 544) 370] cal. BC, implanté et cultivé à plus basse altitude dès l'époque gallo-romaine (Cupillard *et al.*, 1994), atteste de la présence de l'homme. La zone 17 montre un certain développement de *Betula*, *Fraxinus* et *Carpinus* qui semble correspondre à la recolonisation de territoires ouverts précédemment comme le suggère l'allure des courbes de *Picea* et *Fagus* un peu avant 1745 ± 75 BP soit [147 (175, 197) 419] cal. AD. Il apparaît que le comportement de ces arbres varie parallèlement à celui des marqueurs d'anthropisation.

1.7. RAPPORTS ENTRE LES TYPES SÉDIMENTAIRES ET LA CHRONOLOGIE

Le Pléniglaciaire est enregistré dans des dépôts détritiques argilo-silteux non varvés. Ces sédiments présentent entre - 41 m et - 31 m de profondeur, peu d'intercalations sableuses, mais plutôt des niveaux graveleux. Entre - 31 et - 21 m, les lacunes de forage peuvent être interprétées comme des niveaux sableux d'épaisseur régulièrement voisine de 1 m. Entre - 21 et - 13 m, les alternances argiles-sables sont fréquentes, mais les lits de sable ne dépassent que rarement 0.5 cm.

Le début du Tardiglaciaire n'est pas enregistré dans cette colonne sédimentaire. Les craies lacustres posées sur le sédiment argilo-silteux débute au Préboréal et succède rapidement à un niveau plus ou moins organique qui semble avoir enregistré la fin du Dryas récent.

L'ensemble du Boréal n'a pas été enregistré dans les craies lacustres dans le forage LLC1 et les forages jumeaux LLC1-3 et 4. Une partie de cette période est contenue dans de la gyttja. Dans le forage LLC 2, la gyttja est brutalement posée sur les argiles silteuses grises qui couvrent une partie du Boréal.

L'Atlantique est enregistré dans un sédiment de type gyttja (forages LLC1 et LLC2). Dans LLC2, un niveau graveleux fait suite à la gyttja et constitue la base des tourbes datant également de l'Atlantique à la base.

A partir de l'Atlantique, la séquence sédimentaire montre une alternance tourbe-gyttja plus ou moins crayeuse correspondant à une succession de transgression et de régression du niveau lacustre. De telles observations ont déjà fait l'objet de publications sur les sites du Jura (Campy, Richard, 1987 ; Magny, 1991 a, b ; Ruffaldi, 1993). Ces alternances sont interprétées comme des stades de comblement directement liés à la morphologie propre de la cuvette lacustre étudiée et à l'emplacement du forage analysé par rapport à cette dynamique de comblement.

1.8. LES INDICES POLLINIQUES DE L'ACTIVITÉ HUMAINE

Les pollens des plantes poussant dans les cultures et les prairies installées par l'homme, ainsi que les pollens provenant de plantes colonisant les territoires défrichés puis abandonnés permettent, dans les diagrammes polliniques, de définir l'impact de l'homme sur le couvert végétal (entre autres, Turner, 1964 ; Hicks, 1971 ; Ralska-Jasiewiczowa, 1977 ; Behre, 1981). Parmi ces indicateurs polliniques, les *Poaceae* de type *Cerealia*, *Plantago lanceolata*, *Plantago major/media*, les *Chenopodiaceae*, *Artemisia*, *Centaurea*, *Rumex* sont souvent cités. Les courbes polliniques de *Corylus*, *Juniperus*, *Quercus* et *Ulmus* mais également *Juglans*, et parfois *Carpinus* et *Fagus* peuvent donner indirectement des indications sur l'intensité de l'activité humaine dans cette région (Ammann, 1989 ; Rachoud-Schneider, 1993 ; Richard, 1993 ; Richard, Gery, 1993 ; Ruffaldi, 1993 ; Cupillard *et al.*, 1994 ; Richard, 1995 ; Richard, Ruffaldi, 1996 ; Gauthier, 1996). Cette activité humaine se traduit sur le site du Locle par des alternances plus ou moins bien marquées de phases de forte et de faible anthropisation devenant très marquées à partir de l'extrême fin du Subboréal (figure 2.21).

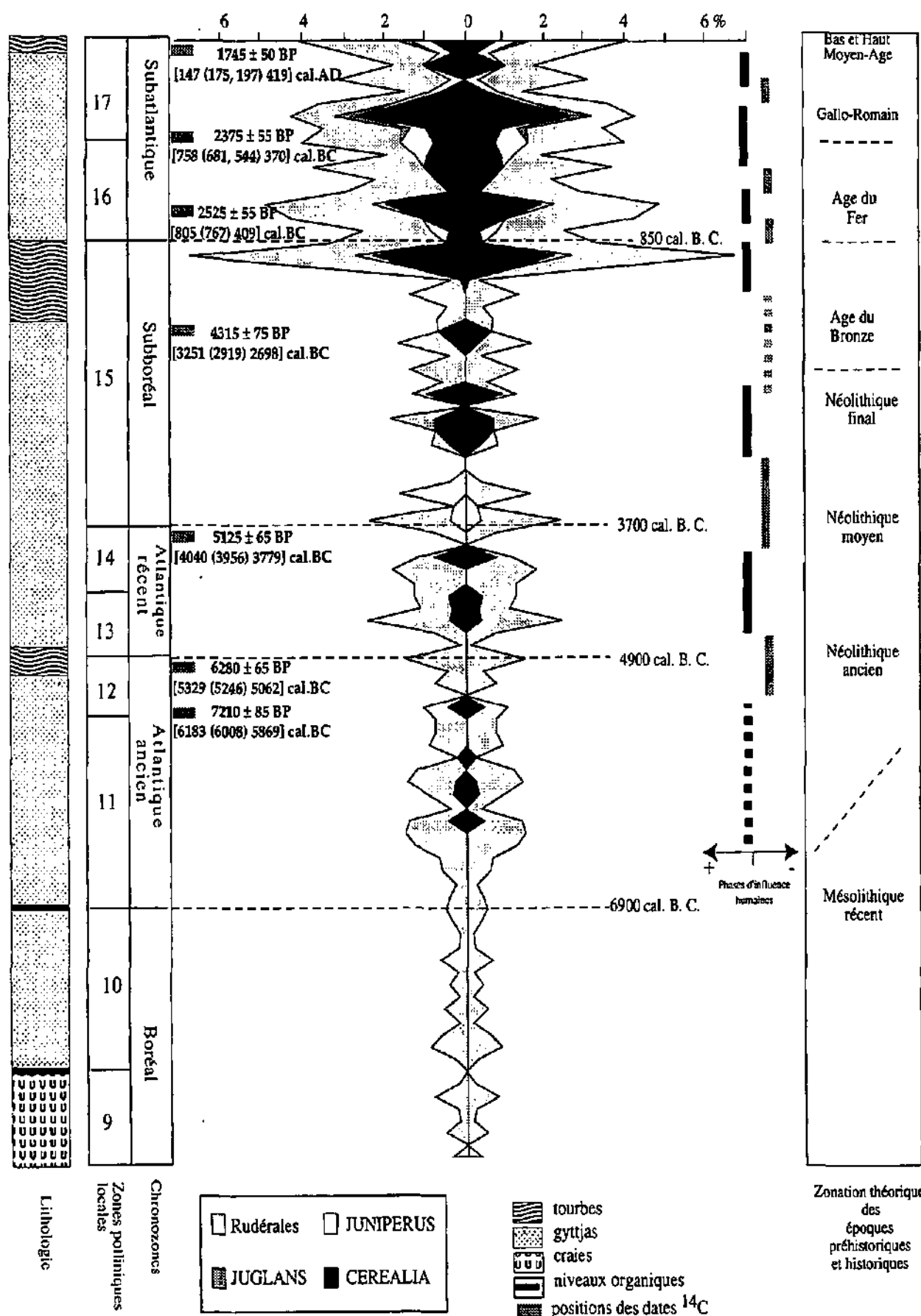


Figure 2.21 : Diagramme pollinique d'anthropisation du Locle

Dans cette partie de la chaîne jurassienne, les plus anciennes traces d'activité humaine reconnues se trouvent sur les sites de Chalain et de Remoray (Cupillard *et al.*, 1994 ; Richard, 1995 ; Richard, Ruffaldi, 1996) ; elles remontent à la seconde moitié de l'Atlantique ancien vers 5500 et 5400 cal. BC. Les sites de Mouthe, Pré Mourey, Morteau/Montlebon, à une altitude voisine de celle de Remoray et dans une zone climatologique actuelle comparable, (Cupillard *et al.*, 1994) montrent les premiers indices de cultures vers la limite de l'Atlantique ancien/Atlantique récent. Au Locle, nous avons vu que les premières *Poaceae* de grosse taille de type *Cerealia* sont présentes dès la fin du Tardiglaciaire jusqu'au milieu de l'Atlantique ancien, mais elles ne sont pas accompagnées du cortège pollinique permettant de les considérer comme des indices d'anthropisation de façon certaine.

La datation précise du passage du Mésolithique (chasse et cueillette) au Néolithique (sédentarisation, élevage, agriculture) n'est pas encore clairement établie dans le Jura. Il est vraisemblable que ce massif soit une zone charnière, un carrefour culturel (Cupillard *et al.*, 1991 ; Cupillard *et al.*, 1994). Les périodes de détériorations climatiques obligèrent les premiers agriculteurs à regagner les régions de plus basses altitudes pour l'installation de leurs cultures (Richard, Ruffaldi, 1996) ; ils revinrent lorsque les conditions s'améliorèrent. La rythmicité d'apparitions des indices d'anthropisation au cours de la période Atlantique pourrait correspondre à ce schéma.

Les premiers indices de cultures apparaissent au Locle à partir de l'Atlantique ancien. Puis, jusqu'à l'âge du Bronze (Subboréal), les indices sont peu marqués. Les plantes rudérales et messicoles montrent des pourcentages faibles. Pendant le Subboréal, la hêtraie-sapinière est en pleine expansion autour du site. On remarque que les zones polliniques 15a, b, c et 15e correspondent à des phases où l'on rencontre des arbustes et des céréales dans les spectres polliniques contemporains de fortes variations des taux d'*Abies*, de *Fagus* et de *Picea*. Ces indices polliniques suggèrent des phases de déboisement qui ont certainement touché la hêtraie-sapinière. L'augmentation de la courbe des céréales et des plantes rudérales à la fin du Subboréal (Bronze final) dénote une occupation importante du sol. Sur les sites de Remoray et Pré-Mourey, un comportement des indices polliniques identique est décrit, il correspond à la période du Bronze Final qui se termine vers 850 cal. BC (Cupillard *et al.*, 1994).

Le passage à l'Age du Fer est marqué très nettement par une brève réduction des indices polliniques d'anthropisation ; ils redeviennent importants vers le milieu de l'Age du Fer. Les défrichements s'opèrent principalement sur le sapin et l'épicéa. La hêtraie-sapinière est indiscutablement perturbée par l'homme.

L'augmentation de la courbe des *Cerealia* et des plantes rudérales pendant l'époque Gallo-Romaine dénote une occupation importante du sol par des cultures. C'est à cette époque que le sapin et l'épicéa régressent fortement. Quant à *Juglans*, il était probablement cultivé à plus basse altitude en raison de sa sensibilité aux gelées printanières ; *Carpinus* prend son véritable essor et *Pinus* est plus représenté.

La chute importante de la courbe des *Cerealia* pourrait correspondre au Haut Moyen Age. On observe en effet, dans de nombreux diagrammes du massif jurassien, une déprise agricole à cette période (Gauthier, 1996). D'une manière générale la partie supérieure des diagrammes polliniques d'anthropisation montre une très importante augmentation des marqueurs d'une activité humaine sur tous les sites du Jura (Cupillard *et al.*, 1994 ; Richard, 1995 ; Richard, Ruffaldi, 1996 ; Gauthier, 1996 par exemple). Au Locle, il n'est pas possible de

percevoir cette étape du peuplement humain ; l'Époque Moderne et Contemporaine n'est certainement pas enregistrée dans ce forage.

Aujourd'hui, la vallée du Locle n'est plus un lieu où les cultures céréalières sont implantées contrairement à la Vallée des Ponts. L'activité principale est l'élevage avec utilisation des espaces non boisés en pâturages. Cette vocation est en partie liée au régime hydrique de surface et au réseau karstique. Sur les anticlinaux, les sols sont maigres, l'eau de surface y est quasiment absente (Burger, Schaer, 1996), seules des pelouses sont maintenues à ces endroits. La vallée du Locle ne permet pas l'installation de cultures avec les moyens techniques actuels. Les flancs des Roches Vournard sont trop abrupts alors que ceux du flanc sud sont trop vallonnés. Le Marais, comme son nom l'indique, n'autorise que l'utilisation des plantes herbacées en fourrage.

2. LE DIAGRAMME DU SITE D'ILAY (JURA, FRANCE)

La séquence du lac d'Ilay a été choisie parce qu'elle permettait d'étudier dans le détail les 3 derniers millénaires. La séquence subatlantique devait être suffisamment développée et de nature bio-géochimique autochtone. Les travaux qui avaient déjà été entrepris sur ce site donnaient également des indications précieuses sur l'histoire de la végétation, la chronologie et les variations du niveau lacustre (sédimentologie, malacologie). Une esquisse paléoclimatique était par ailleurs déjà établie à l'issue de ces travaux (Magny, 1991 a, b ; Magny *et al.*, 1995).

Le forage a été réalisé sur la rive sud de l'île (cf chapitre 1, partie 1, § 1.2.1). Les descriptions lithologiques se trouvent en annexe n°7. Une cinquantaine d'échantillons (prélevés tous les 2 cm) a été préparée (cf. § chapitre 2, partie 1) ; environ 21000 pollens et spores appartenant à 76 taxons ont permis d'établir le cadre paléoenvironnemental couvert par cette séquence. Cinq zones polliniques locales ont été identifiées et deux datations ^{14}C ont été effectuées dans le niveau organique intercalé dans la craie lacustre (figure 2.22).

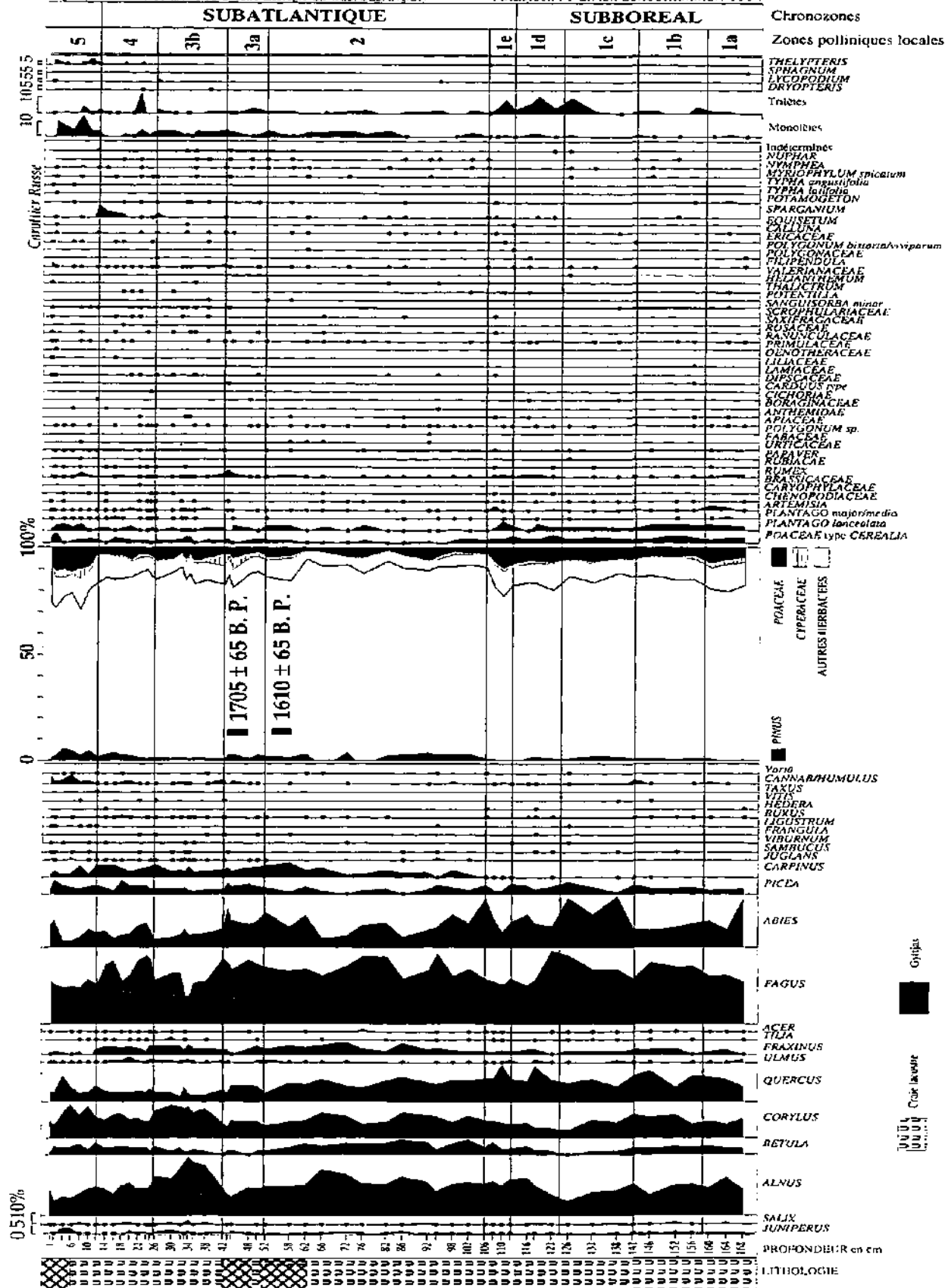
2.1. LES ZONES POLLINIQUES LOCALES

Les zones polliniques locales reportées sur le diagramme 2.22 sont décrites dans l'annexe n°8.

2.2. LES CONCENTRATIONS ABSOLUES ET ZONES POLLINIQUES LOCALES

Elle peut être scindée en 4 épisodes décrits dans le détail dans les annexes n° 13 et 14 :

- le premier entre - 170 et - 160 cm avec des concentrations absolues de 10 à $20 \cdot 10^3$ pollens/gr. ;
- le second, de - 160 à - 125 cm avec des concentrations absolues basses voisines de $10 \cdot 10^3$ grains/gr. de sédiment ;
- le troisième de - 120 à - 125 cm avec des concentrations absolues de $5 \cdot 10^3$ pollens grains/gr. de sédiment ;



Histoire

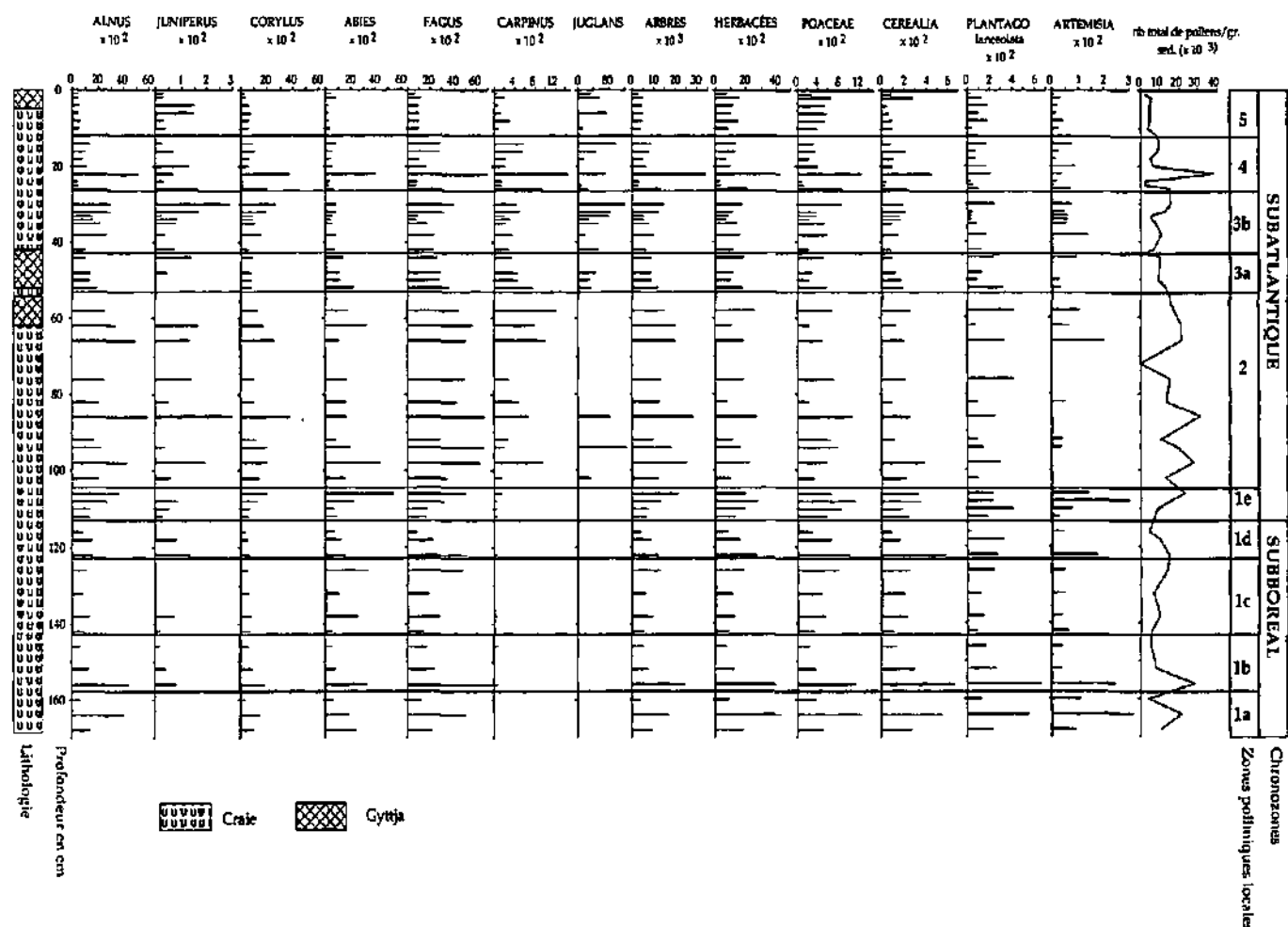


Figure 2.23 : Concentrations polliniques absolues des principaux taxons du forage d'Ilay

- le quatrième de - 105 à - 65 cm avec des concentrations assez élevées de l'ordre de $20 \cdot 10^3$ grains/gr. de sédiment.

2.3. HISTOIRE DE LA VÉGÉTATION

Afin de reconstituer l'histoire de la végétation sur le site d'Ilay, les zones polliniques locales détaillées plus haut sont comparées aux zones polliniques régionales décrites dans de nombreux sites français et suisses (Wegmüller, 1966 ; Matthey, 1971 ; Ammann *et al.*, 1983 ; Richard, 1983 ; Gaillard, 1984 a, b ; Ammann, 1985, 1989 a, b ; Ammann, Lotter, 1989 ; Chaix *et al.*, 1989 ; Lotter *et al.*, 1992 a, b, c ; Guélat *et al.*, 1993 ; Ruffaldi, 1993 ; Beaulieu de *et al.*, 1994 ; Magny *et al.*, 1995). Les zones de Firbas (1949, 1954) définies et datées pour le Plateau Suisse servent de base à la chronologie et sont utilisées en tant que chronozones.

2.3.1. Les apports des travaux antérieurs

La région d'Ilay a, pour sa richesse en milieux lacustres et palustres (cf figure 1.20 partie 1), suscité de nombreux travaux. Les sites étudiés les plus proches sont : le lac de Petit-Maclu et de Narlay (figure 1.15 et 1.16) analysés par Wegmüller en 1966. Dans le premier, sont décrites les chronozones allant du Dryas ancien à l'Atlantique récent. En revanche, le

second donne une évolution plus détaillée de la période Holocène et plus particulièrement du Subboréal et du Subatlantique. Il a fait l'objet d'analyses polliniques et archéologiques (Chaix *et al.*, 1989) puis d'analyses polliniques, sédimentologiques et malacologiques (Magny *et al.*, 1995).

2.3.2.1. Le Subboréal

Wegmüller (1966) place la limite Atlantique récent/Subboréal quand la courbe de *Fagus* atteint 40 % et que les courbes d'*Ulmus* et de *Tilia* régressent de manière continue. A cette limite, cet auteur observe également la diminution des pollens de *Poaceae* de type *Cerealia* et un changement de sédimentation (niveau de gyttja crayeuse intercalé dans la craie lacustre). Tout le Subboréal est marqué par des taux d'*Abies* et de *Fagus* variant entre 20 et 30 %. Dès le début de cette chronozone, les indices anthropisation sont variés et prennent de plus en plus d'importance. Une mesure radiocarbone date, à Narlay, les premières occurrences de *Carpinus* à 3500 ± 200 BP (Wegmüller, *loc. cit.*). Cette date est à notre sens beaucoup trop vieille et doit être rejetée.

2.3.2.2. Le Subatlantique

Sur le site de Narlay, la limite entre le Subboréal et le Subatlantique est fixée par l'augmentation rapide des pourcentages d'*Abies* et de *Quercus* (Wegmüller, 1966 ; Magny *et al.*, 1995). La date 1050 ± 80 BP (Wegmüller, 1966) cale chronologiquement la brusque hausse d'*Abies* sur ce site. La hausse des *Poaceae*, des *Poaceae* de type *Cerealia*, la récurrence de *Juniperus* ainsi que celle d'*Alnus* contemporaine d'un recul d'*Abies* soulignent, pour cet auteur, la limite entre le Subatlantique ancien (IX) et le Subatlantique récent (X). A cette altitude, on remarque que le hêtre et le sapin dominent très nettement la strate arborée ; *Carpinus* occupe une place plus importante dans la dynamique de la végétation que *Picea*.

Les travaux les plus récents (Magny *et al.*, 1995) placent, à Ilay, la limite Subboréal/Subatlantique entre - 98 et - 93 cm de profondeur. Cette limite correspond à la croissance de *Carpinus* et à la régression de *Picea* dans les spectres polliniques.

Dans la plupart des diagrammes récent, la fin du Subboréal coïncide avec une augmentation des pollens d'herbacées liées à l'activité humaine comme les *Cerealia*, *Plantago lanceolata*, *Artemisia* et *Rumex* (Richoz, Gaillard, 1989 ; Guélat *et al.*, 1993 ; Richard, 1993 ; Richard, Gery, 1993 ; Richoz *et al.*, 1994 ; Gauthier, 1996 par exemple). A Narlay, sur le diagramme de Wegmüller (1966) rien de tel n'apparaît et laisse penser que la limite qu'il propose est mal placée : elle se situerait plutôt vers 240 cm de profondeur (Richard, 1995 ; Gauthier, 1996) contre 110 cm (Wegmüller, 1966). Le diagramme proposé dans les travaux de Magny *et al.* (1995) donne seulement l'intervalle de profondeur dans lequel on a la plus forte probabilité de placer la limite Subboréal/Subatlantique à Ilay.

2.3.2. Nouvelles données

Une maille d'échantillonnage plus fine (2 cm) contre 4 voire 15 cm pour les auteurs précédents (Wegmüller, 1966 ; Magny *et al.*, 1995), permet de suivre de manière plus détaillée l'évolution de la végétation pendant le Subboréal et le Subatlantique sur le site d'Ilay (figure 2.12).

2.3.2.2. Le Subboréal (zones 1a, 1b, 1c et 1d)

En se référant aux travaux cités ci-dessus, le Subboréal est partiellement représenté sur ce diagramme où seule la partie terminale (zone pollinique locale 1a à d) est enregistrée.

La hêtraie-sapinière est bien développée, l'épicéa est très discret sur ce site. Certains éléments de la chênaie-mixte (*Quercus*, *Ulmus*, *Fraxinus*) sont encore relativement abondants. Les pourcentages d'*Alnus* sont très élevés, ils suggèrent la présence d'aulnaies proche du point de forage. Les pourcentages des *Poaceae*, des *Poaceae* de type *Cerealia* de même que ceux des plantains et d'*Artemisia* sont très élevés. Les plantes indicatrices d'une activité humaine sont régulièrement représentées. Les défrichements sont importants comme l'indiquent les pourcentages de *Juniperus*, *Betula* et *Corylus*. Toutefois (zone 1d), la hausse des spores soulignerait une intensification de la pratique des brûlis (Tolonen, 1983 ; Richoz, Gaillard, 1989) ; une diversification taxonomique s'en suit, elle est probablement liée à la présence de nouveaux biotopes. L'augmentation des rudérales (*Artemisia*, *Rumex*, *Chenopodiaceae*) peut être attribuée à une occupation humaine de l'Âge du Bronze Final. La limite supérieure de cette période est placée entre les zones 1d et 1e lorsque la présence de *Carpinus* devient continue.

2.3.2.2. Le Subatlantique (zones 1e, 2, 3a et 3b, 4 et 5)

Le Subatlantique est couvert, sur ce diagramme, par les zones polliniques locales 1e, 2 à 5. Cette chronozone est toujours dominée par le hêtre ; *Abies* est en régression contrairement à *Alnus* qui prospère. La végétation arborée paraît regagner les espaces défrichés précédemment. Ainsi *Juniperus*, *Betula*, *Fraxinus* et *Corylus* se développent. *Carpinus*, grâce à sa grande faculté de régénérescence, est probablement favorisé par les défrichements.

L'existence de pâturages boisés est soulignée, dans les diagrammes, par les augmentations des pourcentages de *Juniperus* (Roesch, 1983 ; Richoz, Gaillard, 1989 ; Richoz et al., 1994). Ce taxon est favorisé car déprécié des animaux. *Plantago lanceolata*, moins représenté qu'auparavant, suggère également l'existence de pâturages boisés (Hadorn, 1987, 1992). La présence quasi permanente de spores monolètes souligne une dynamique végétale de recolonisation de certains milieux. La présence de *Juglans* caractérise, malgré ses faibles pourcentages l'époque gallo-romaine.

La fin de la zone pollinique 2 est datée par le radiocarbone à 1610 ± 65 BP. La sous-zone 3a est datée, dans sa partie supérieure, à 1705 ± 65 BP. Ces dates indiquent le début du Haut Moyen-Age. Ces dates ^{14}C sont inversées, calibrées cette incohérence n'apparaît plus :

- Ly - 25-0 (OXA - 4392) donne 1705 ± 65 BP soit [153 - 494 AD]

- Ly 24-0 (OXA - 4391) donne 1610 ± 65 BP soit [268 - 586 AD]

La seconde partie du Subatlantique est représentée par les zones polliniques 3b à 5. L'augmentation des *Poaceae* et des plantains témoignent d'une recrudescence de l'impact de l'homme sur le milieu (zones 3a et 5). Paradoxalement, des indices polliniques comme *Juniperus* et *Corylus* soulignent une déprise pastorale. Indirectement, les pourcentages de

Salix, de *Betula* et de *Fraxinus* (et peut être *Alnus*), espèces colonisatrices des milieux ouverts et des ourlets forestiers, augmentent parallèlement à ceux de *Juniperus* et de *Corylus*. Ces variations coïncident avec un changement sédimentaire très marqué : le passage d'une sédimentation organique à une sédimentation carbonatée.

La végétation riveraine se développe considérablement, elle se traduit dans le diagramme par des pourcentages accrus d'*Alnus*, *Salix* et *Filipendula* en particulier. Ces taxons révèlent la présence d'une mégaphorbiaie se boisant progressivement avec *Salix* et *Alnus* (Putot, 1975 ; Gallandat, 1982 ; Richard, 1991, 1993). Ces spectres polliniques donnent une relativement bonne perception de la végétation locale.

2.4. LES INDICES POLLINIQUES DE L'ACTIVITÉ HUMAINE SUR LE SITE D'ILAY

Les données archéologiques attestent que l'occupation de l'île de la Motte remonte au Néolithique (Chaix *et al.*, 1989). L'activité humaine est, à travers la présence de certains pollens (*Cerealia* et rudérales), importante et continue (figure 2.24). Toutefois, des variations d'intensité de l'action de l'homme sur le milieu sont observées. La partie médiane du diagramme (zone 2), correspondant à l'époque Gallo-romaine, montre un impact humain sur la végétation plus faible que pour les périodes précédentes : le Bronze Final (zones 1a à 1d) et l'Âge du Fer (zone 1e).

Le diagramme d'anthropisation montre que le site d'Ilay est le siège d'une occupation humaine importante à la fin du Subboréal (Bronze Final). Les indices polliniques d'anthropisation sont notamment très abondants à la transition Subboréal-Subatlantique (entre les zones polliniques locales 1d et 1e).

La première partie du Subatlantique (Âge du Fer) se traduit (zone 1e) par une activité humaine bien marquée qui va rapidement diminuer (début de la zone 2). Les pourcentages de *Juniperus*, en nette augmentation, suggèrent une phase de déprise.

L'époque Gallo-romaine débute avec la présence de *Juglans* ; les faibles pourcentages de céréales et la relative abondance de *Juniperus* (zone 2) soulignent ici une période de déprise ou bien l'installation de pâturages boisés (Behre, 1981 ; Richoz, *et al.*, 1994). Au cours de cette période, on note une certaine stabilité dans la représentation des indices polliniques.

Les datations radiocarbone effectuées sur ce forage font apparaître que l'époque Gallo-romaine est bien dilatée. Ces datations ¹⁴C permettent d'attribuer la partie supérieure de ce diagramme à la période du Haut Moyen Âge, du Bas Moyen Âge, à l'Époque Moderne et Contemporaine. Sur ce site, le Haut Moyen Âge n'apparaît pas comme une période de déprise, l'activité humaine est régulière. Habituellement, dans les diagrammes effectués dans le Jura, la multiplication des indices polliniques d'anthropisation marque le début du Bas Moyen Âge (Cupillard *et al.*, 1994 ; Gauthier, 1996), mais dans ce diagramme ceci n'est pas reconnaissable.

Au sommet de ce diagramme, le développement maximal des indices d'anthropisation marque les Époques Modernes et Contemporaines. La dendrochronologie a permis de dater des restes d'un pont en bois (1394 AD) reliant l'île à la berge (Lambert, Lavier, 1993 ; Magny

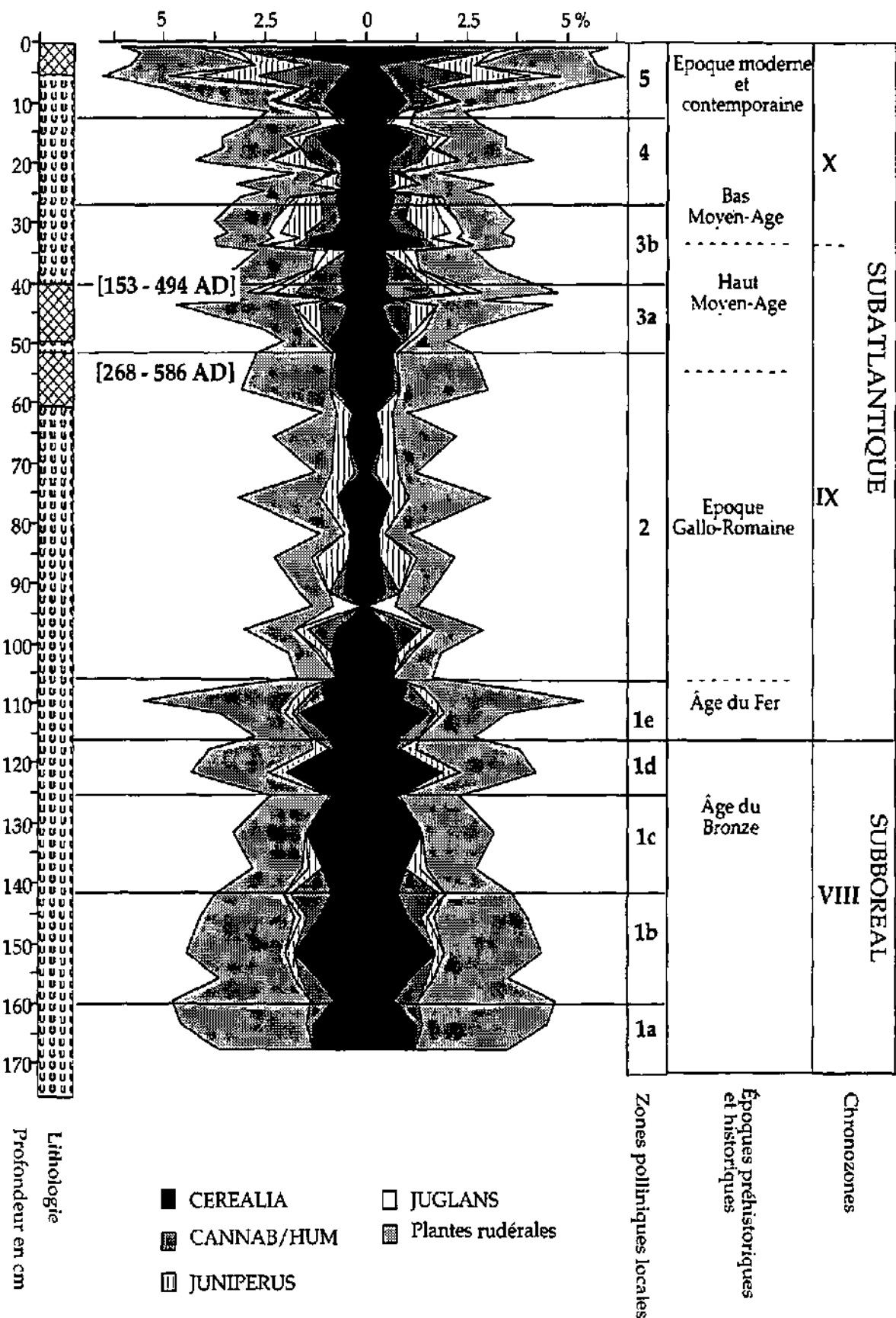


Figure 2.24 : Diagramme pollinique d'anthropisation d'Ilay

et al., 1995). Ces bois sont certainement en relation avec l'installation d'un monastère sur l'île à l'époque médiévale.

Il est possible que l'image de la végétation qui est obtenue à partir de ce forage soit faussée par la proximité du site archéologique et de la rive.

Les analyses polliniques détaillées de cette carotte permettent en outre, de percevoir globalement différents stades d'évolution de la végétation des secteurs proches du point de forage, en particulier dans la zone 3b où une hausse du niveau de l'eau est envisageable. Cette hausse pourrait provoquer une extension des zones où l'aulne se développe favorablement. La forte représentation d'*Alnus* peut correspondre également à différents stades d'abandon des prairies proches du lac (Richard, 1993). Ces zones sont caractérisées sur le diagramme par les variations des pollens de plantes issues de la mégaphorbiaie, d'*Alnus* et de *Salix*. On sait que le *Filipendulion* est un groupement à hautes herbes présent dans les zones inondables non fauchées et nitrophiles. Lorsqu'il n'est plus entretenu par l'homme, ce groupement végétal peut évoluer en *Alno-Padion* (boisement progressif par l'aulne et les saules) (Gallandat, 1982 ; Richard, 1991, 1993 ; Hadorn, 1992, 1994). Mais, il ne faut pas exclure la possibilité que ces forts pourcentages d'*Alnus* soit liés à la dispersion très forte de ce taxon ou à son accumulation sur la rive du lac ; il faut donc rester prudent car il est un "élément perturbateur" des diagrammes polliniques (Janssen, 1959 ; Ruffaldi, 1993).

3. LES GRANDES LIGNES DE L'HISTOIRE DE LA VÉGÉTATION DU LOCLE ET D'ILAY

La détermination du contenu sporopollinique des sédiments du Locle et d'Ilay a permis de reconstituer les grandes lignes de l'évolution du couvert végétal depuis plus de 20 000 ans.

Au Locle, malgré les incohérences des datations ^{14}C , il est possible d'avancer l'hypothèse selon laquelle la sédimentation de la cuvette lacustre a commencé immédiatement après le retrait du glacier würmien. La végétation y est caractérisée localement par une flore herbacée pauvre. Les spectres polliniques sont dominés par les apports lointains de pin dans près de 28 m de sédiments.

Une lacune importante dans l'histoire de la végétation au Locle couvre quasiment tout le Tardiglaciaire. Toutes les étapes décrites sur les sites voisins à propos de la colonisation progressive des espaces libérés par la glace n'apparaissent pas. Seule l'extrême fin du Dryas récent semble bien marquée ; une dominance du pin, du genévrier et du bouleau y est observée. Le tapis herbacé est constitué principalement d'armoises, de poacées et de plantes héliophiles caractéristiques de milieux très ouverts.

Le Préboréal (env. 10 000 - 9000 BP) est caractérisé par l'abondance du pollen de pin qui suggère la présence de véritables pineraies relativement proches du site. Toutefois, les premiers pollens de feuillus (bouleau et noisetier) témoignent du développement de ces taxons à plus basse altitude.

Histoire de la végétation

Très brusquement, le diagramme montre une diminution des pollens de pin au profit de celui du noisetier caractéristique du Boréal (env. 9000 - 8000 BP). L'essor de cette essence au feuillage caduc traduit les premières améliorations climatiques autour du site. Parallèlement, d'autres essences progressent au niveau régional ; ce sont les ormes, les chênes, puis plus tardivement le tilleul.

Ces arbres atteignent leur plein essor pendant l'Atlantique ancien (env. 8000 - 6000 BP). Au Locle comme sur d'autres sites, l'abondance du lierre et du houx soulignent cet optimum climatique. Le frêne et l'érable montrent leur développement maximal au cours de cette période. L'optimum de *Fraxinus* est très bien calé chronologiquement, il débute vers 7210 ± 85 BP [6183 (6008) 5881] cal. BC et s'achève vers 6280 ± 65 BP [5329 (5246) 5062] cal. BC, cette dernière date correspond à la fin de l'Atlantique ancien sur le site du Locle.

Les limites chronologiques de l'Atlantique récent ont été placées à 6280 ± 65 BP [5329 (5246) 5062] cal. BC et à 5125 ± 65 BP [4040 (3956) 3779] cal. BC au Locle. Pendant cette période, on assiste à l'installation et au développement du sapin, du hêtre et de l'aulne. En revanche, le frêne, l'orme et le tilleul régressent. C'est dans ce cadre environnemental que les premières traces d'une activité humaine sur ce site sont véritablement reconnues.

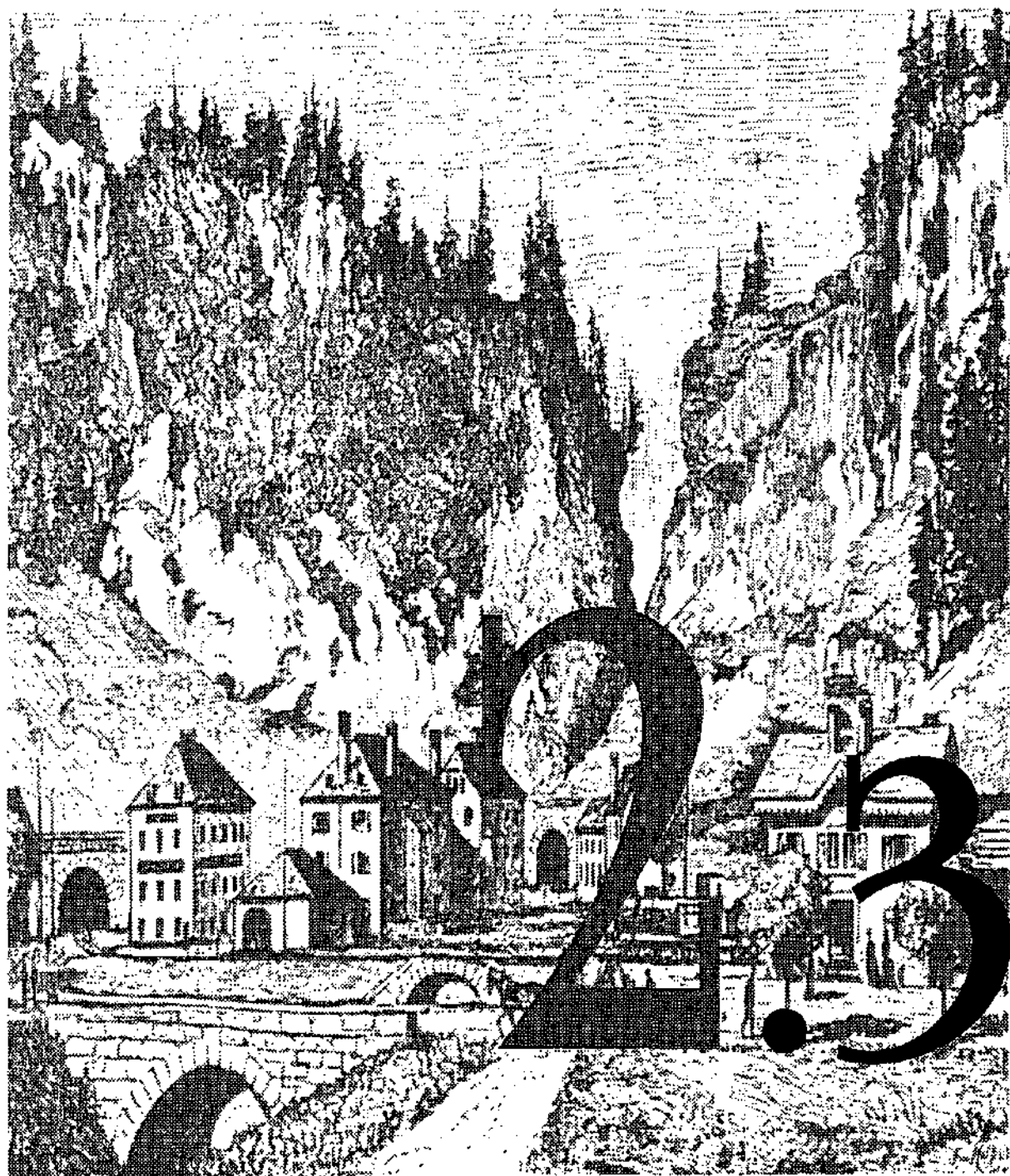
Au Locle, le Subboréal est calé entre 5125 ± 65 BP [4040 (3956) 3779] cal. BC et 2525 ± 55 BP [805 (767) 409] cal. BC. Le Subboréal est caractérisé par l'essor de la hêtraie-sapinière et de l'épicéa. Sur le site d'Ilay, le Subboréal est partiellement représenté ; le hêtre, le sapin et l'aulne y jouent un rôle important dans la végétation.

Le Subatlantique débute au Locle vers 2525 ± 55 BP soit vers [805 (767) 409] cal BC mais il n'y est pas enregistré en totalité ; il se termine vers 1745 ± 50 BP soit [147 (175, 197) 419] cal. AD. Il est, en revanche relativement détaillé à Ilay. La végétation du Subatlantique est caractérisée dans les deux sites par la prédominance de la hêtraie-sapinière et l'apparition du charme et du noyer. La proportion du charme est plus importante à Ilay. Dans les deux cas, les taux de noyer sont peu importants en raison de l'altitude de ces sites. Les diagrammes polliniques d'anthropisation montrent que l'impact de l'homme sur la végétation a été continu depuis le Subboréal. Au Locle, cet impact est discontinu mais les phases d'activité sont d'intensité croissante du Subboréal au Subatlantique. A Ilay, on a pu remarquer une continuité dans l'activité humaine sans véritable intensification au Subatlantique comme on le voit souvent sur les diagrammes rencontrés dans la littérature.



Cône d'épicéa

Minéralogie



Le Col-des-Roches à la fin du siècle dernier, par Fritz Huguenin-Lassaugette. Les glacis d'éboulis qui tapissent la falaise du Col commencent à être exploités, le tunnel routier ayant supplanté le chemin qui les gravissait en écharpe jusqu'à l'échancrure rocheuse (cf. Page de couverture) pour redescendre en France. Le chemin de fer Le Locle-Morteau, inauguré en 1884, a nécessité la construction d'un second pont sur le Bied, Gravure du Musée d'histoire du Locle in Burger, Schaer, 1996

Histoire des sédiments

La nature, la composition et l'origine des différents composants minéraux et chimiques des sédiments sont à l'image des apports, des processus sédimentaires et des conditions climatiques au moment du dépôt. Les minéraux peuvent avoir deux origines : l'une allochtone (apports éoliens, ruissellements, re-suspensions), l'autre autochtone (bioproduction, précipitations chimiques). Ces sources différentes conditionnent la composition minéralogique des sédiments. Les minéraux allochtones jouent le rôle de traceurs naturels ; par les associations constituées, ils indiquent leurs provinces d'origines (Bapst, 1987).

La composition minéralogique globale des sédiments de ces deux lacs permet de définir minéralogiquement les faciès composant les différentes unités lithostratigraphiques rencontrées dans les forages. Dans un second temps, une analyse plus détaillée des fractions argileuses de ces sédiments permet de déterminer les phyllosilicates et les minéraux en grains qui leurs sont associés. Seules les préparations orientées permettent de différencier les divers minéraux argileux ; leurs réflexes 001 sont caractéristiques. Ces analyses devraient également mettre en lumière des associations minéralogiques qui pourraient être masquées, dans le sédiment total, par la présence de certains minéraux. En effet, il arrive qu'un type particulier de minéral (comme la calcite) soit sur-représenté et favorisé. Ces analyses visent également à repérer un ou plusieurs minéral (aux) qui pourraient refléter les oscillations climatiques (Finger *et al.*, 1984 ; Dean, 1993 ; Bertaux *et al.*, 1996).

Histoire

1. LE SITE DU LOCLE, LE MARAIS DU COL-DES-ROCHES (NEUCHÂTEL ; SUISSE)

1.1. MINÉRALOGIE DU SÉDIMENT TOTAL

1.1.1. Étude des minéraux non argileux du forage LLC 1 et description des zones minéralogiques

Nous avons prélevé 156 échantillons pour 41 m de sédiment dans le forage LLC 1 ; ils ont été traités selon la méthode qui est exposée § 3.2. partie 1, chapitre 2. L'analyse diffractométrique des poudres donne la composition minéralogique globale suivante :

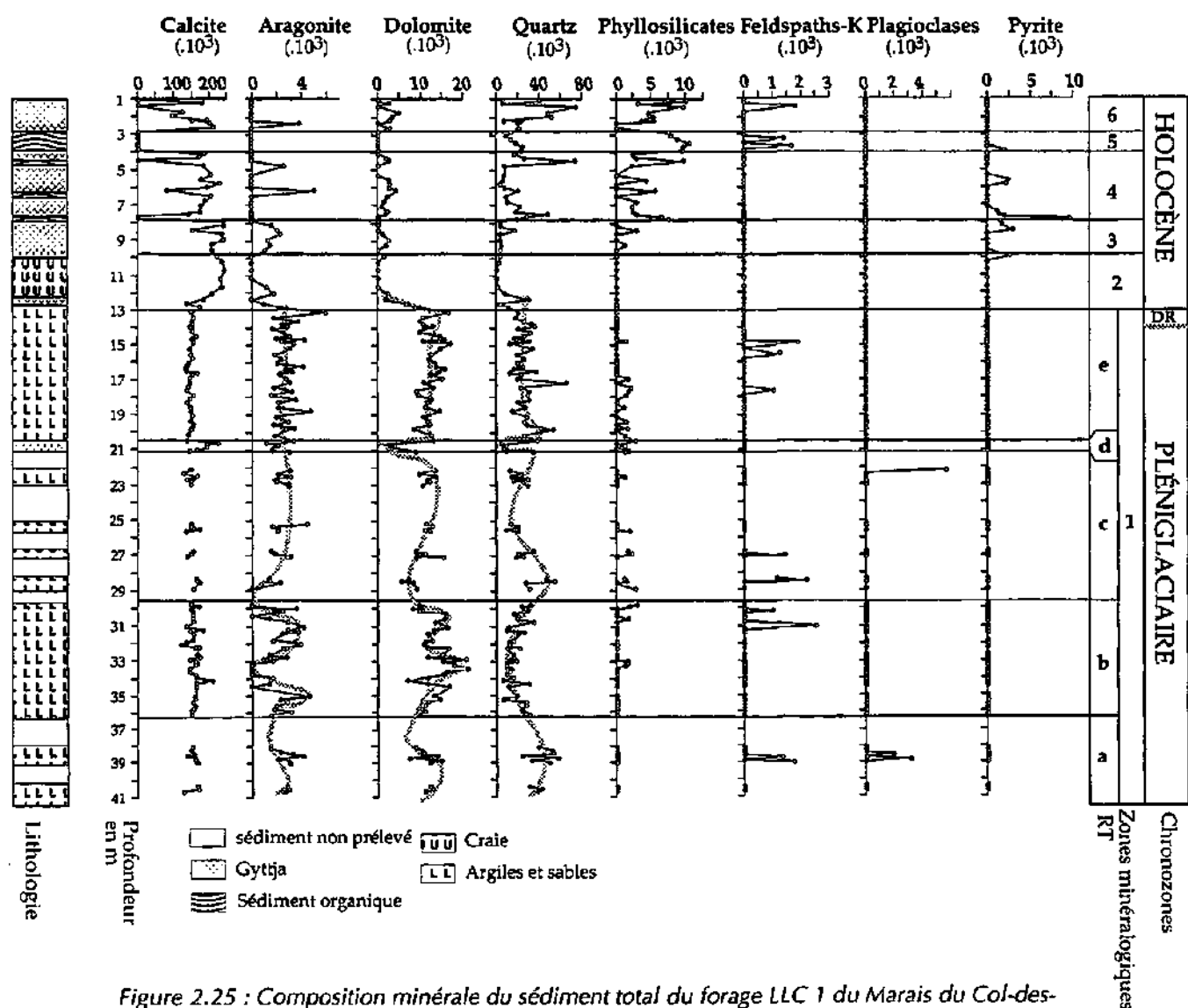


Figure 2.25 : Composition minérale du sédiment total du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) obtenue par diffraction aux rayons X, Intensités brutes en CPM (Coups Par Minute)

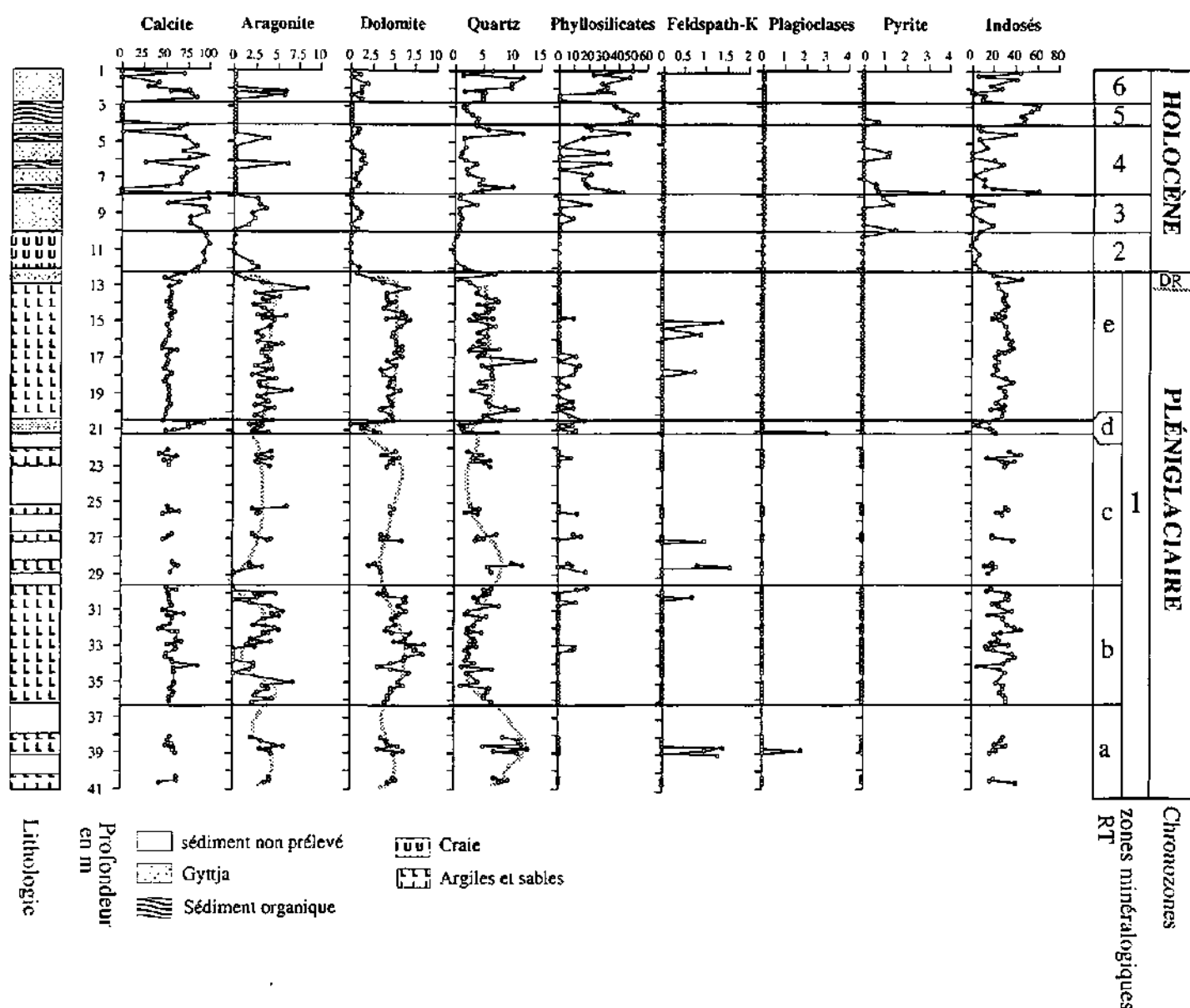


Figure 2.26 : Pourcentages des minéraux du sédiment total en fonction de la profondeur du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

- des minéraux carbonatés : la calcite, l'aragonite et la dolomite ;
- des minéraux silicatés : le quartz, les feldspaths potassiques, les plagioclases et les phyllosilicates ;
- un minéral d'une autre nature (sulfuré) : la pyrite, témoin d'un milieu réducteur persistant.

La figure 2.25 présente les intensités des pics (en CPM) des différents minéraux de ce forage ; la figure 2.26 présente les valeurs des pourcentages des minéraux contenus dans ces sédiments. Les données brutes sont disponibles dans les annexes 15 et 16. Six zones minéralogiques majeures (RT1 à RT6, RT : Roche Totale) peuvent être distinguée ; elles sont décrites en annexe n° 17.

1.1.2. Traitement statistique des données

Les méthodes statistiques sont nombreuses ; on peut, par exemple, rechercher les coefficients de régression linéaires entre les différents minéraux (étape 1 de la figure 2.27). C'est un travail long et fastidieux qui est de plus difficile à interpréter. L'Analyse Factorielle en Composantes Principales (ACP) a donc été employée car le nombre de variables (minéraux) et d'échantillons (niveaux) est suffisamment élevé (Benzécri, 1973, 1980 ; Bouroche, Saporta, 1989). L'ACP permet de représenter tous les échantillons dans un espace à $n-1$ variables. Si les variables sont corrélées, alors elles forment un facteur principal (facteur 1) qui a le pourcentage de variance le plus élevé. Les facteurs suivants (2, 3 ...) ont des poids plus faibles (étape 2 de la figure 2.27). Sur ces plans factoriels, chaque échantillon est décrit par sa contribution. Pour des besoins stratigraphiques, nous avons choisi comme Gindraux et Kübler (1989) de représenter la contribution des échantillons en fonction de la profondeur pour plusieurs facteurs (figure 2.28). Dans chaque cas, le poids des variables est précisé. L'ACP a été réalisé sur les pourcentages des minéraux. Le fait de choisir les données en pourcentages plutôt que les intensités brutes évite de prendre en compte les variations d'intensités dues à l'évolution du tube produisant les rayons X au cours du temps. Mais l'utilisation des pourcentages entraîne l'existence d'une relation entre les différentes

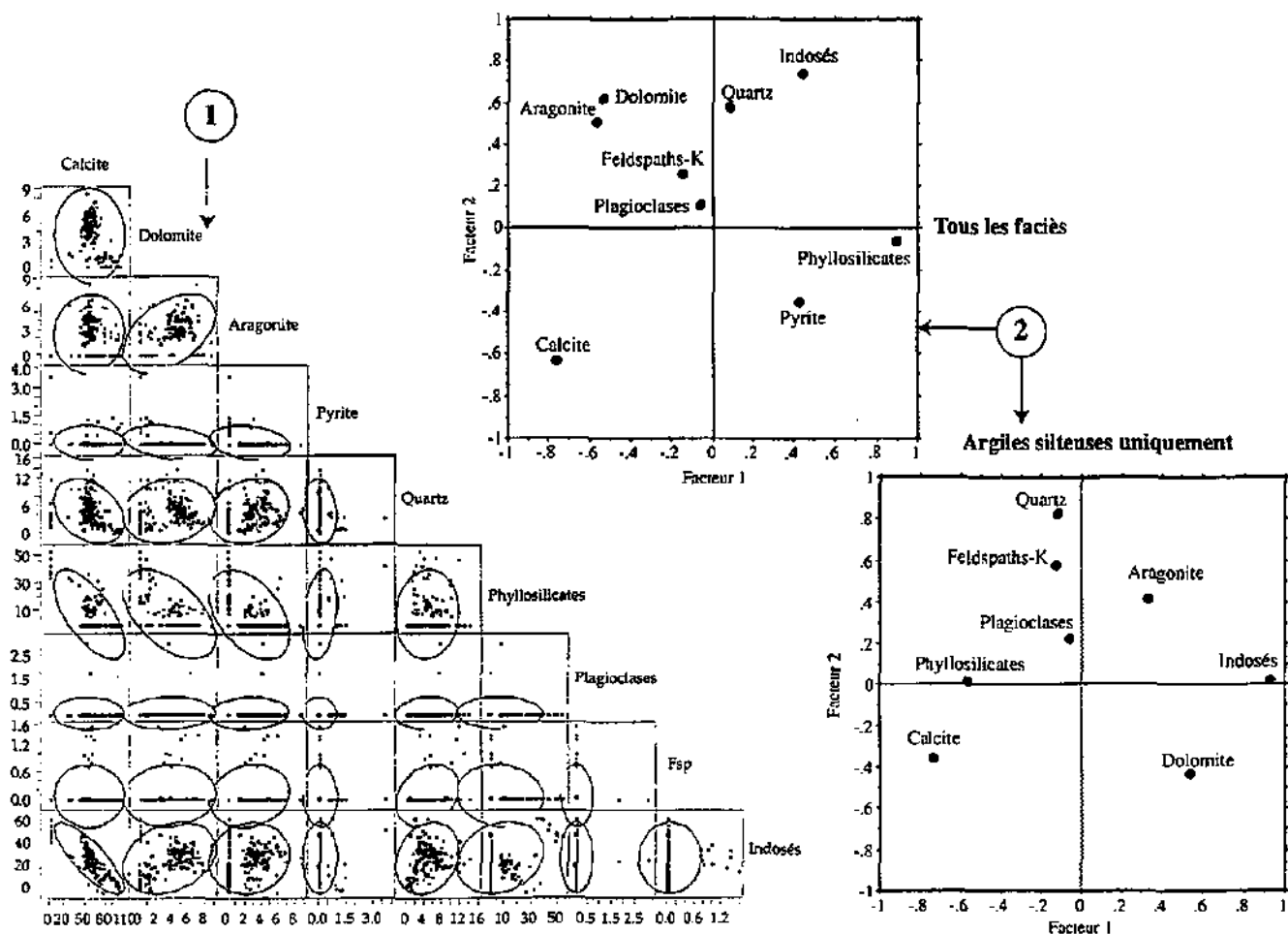


Figure 2.27 : 1- Comparaison des minéraux deux à deux : recherche des coefficients de corrélations linéaires entre les variables 2- Analyse factorielle en Composantes Principales des pourcentages de tous les minéraux du sédiment total du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

variables : leur somme vaut toujours 100 (Bouroche, Saporta, 1989). Sur les deux figures (2.27 et 2.28), les lignes en pointillée correspondent à des limites de contribution ; de part et d'autre de ces lignes les contributions sont souvent opposés. On peut observer 7 limites délimitant 8 zones de distinctes.

Les zones 1, 2 et 4 correspondent aux argiles silteuses grises. Le niveau qui n'est pas en place, à - 21 m de profondeur (3), est très bien individualisé.

La zone 5 correspond aux faciès des craies lacustres. Entre les zones 5 et 6 on observe une variation des contributions qui est due à la présence de silico-clastiques bien que la calcite domine toujours dans le sédiment. Cette limite coïncide avec l'apparition des craies organiques identifiées comme des gyttjas dans les logs stratigraphiques.

Entre 3 et 4 m de profondeur, les tourbes sont représentées, sur les figures, par des contributions très différentes de celles des zones 6 et 8 (alternances de gyttjas et de tourbes).

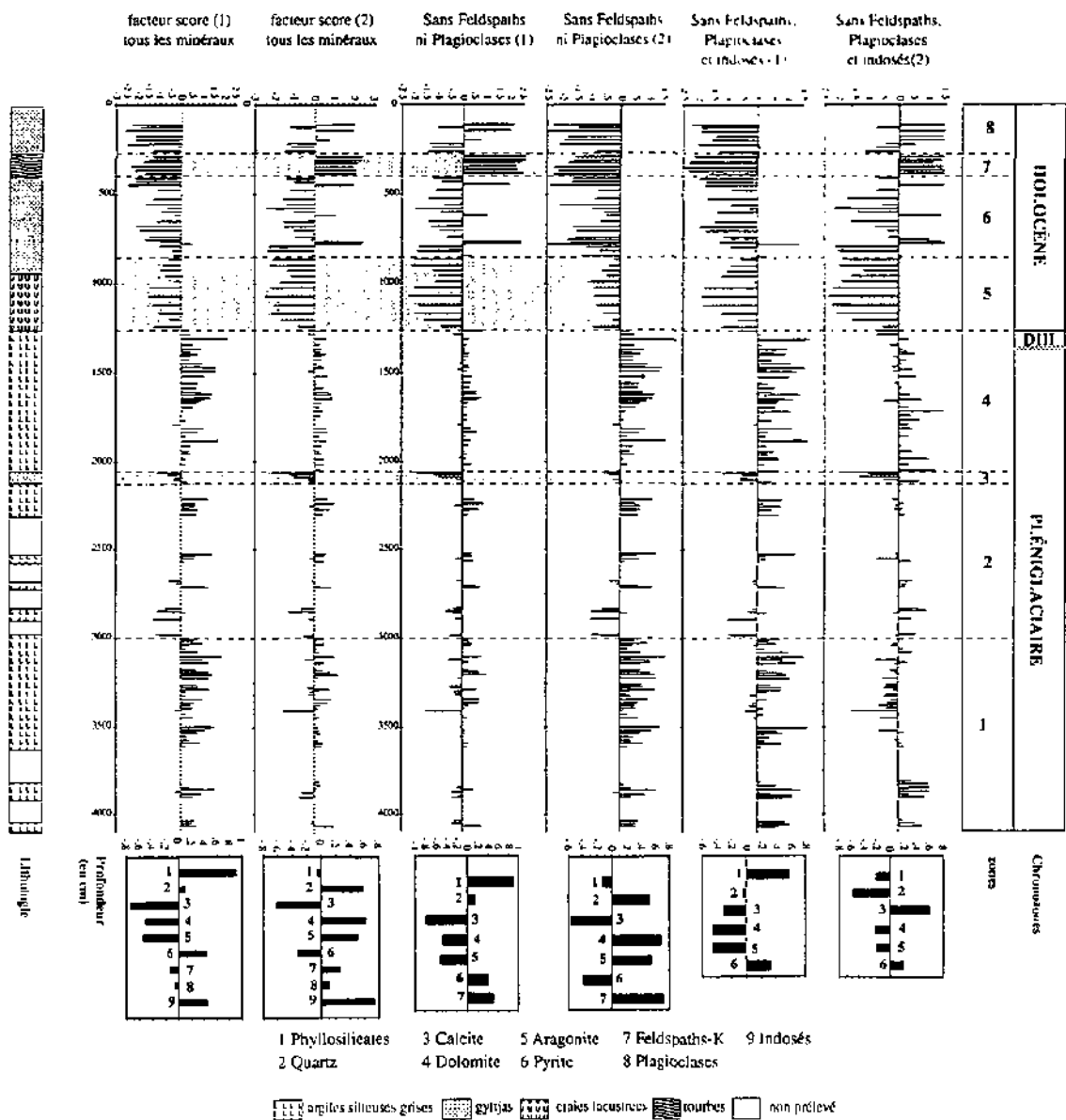


Figure 2.28 : Analyse factorielle en Composantes Principales des pourcentages des principaux minéraux du sédiment total du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

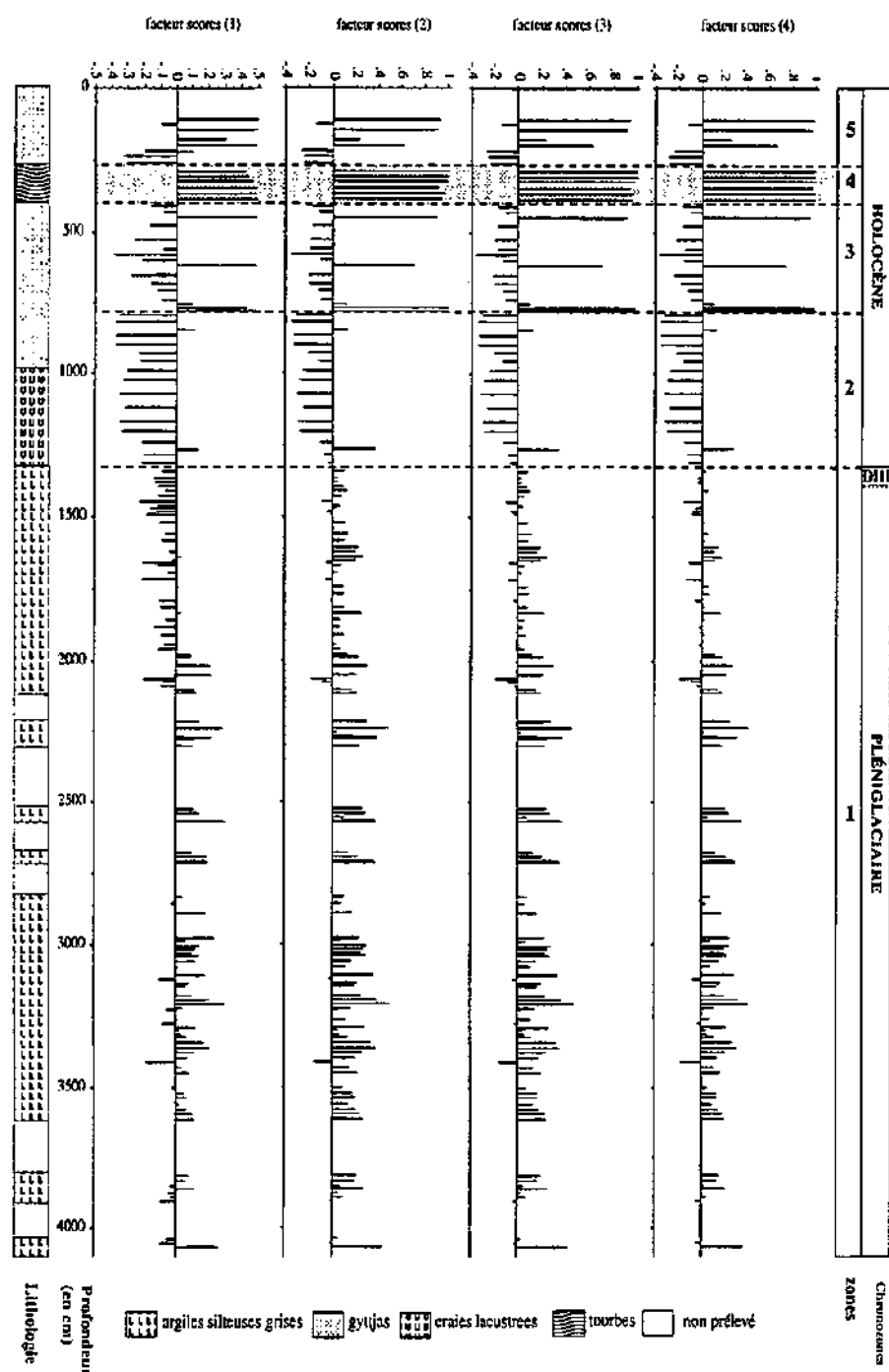


Figure 2.29 : Analyse factorielle en Composantes Principales des niveaux du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

Dans un second temps, nous avons comparé les niveaux entre eux. Pour cela, chaque variable (minéraux identifiés) devient un échantillon, et chaque niveau devient une variable. Les résultats de la contribution des variables sont présentées dans la figure 2.29. Les traits en pointillés correspondent comme précédemment à des limites de contribution. Quatre limites sont clairement identifiées.

- La première, entre les zones 1 et 2, correspond à la distinction entre les niveaux d'argiles silteuses grises et les craies lacustres.

- La seconde, entre les zones 2 et 3, marque la présence d'un niveau tourbeux, mais ne permet pas de distinguer les craies organiques des autres craies lacustres.

- La troisième, entre les zones 3 et 4, correspond à la limite inférieure des tourbes.
- La quatrième, entre les zones 4 et 5, marque la limite supérieure des tourbes.

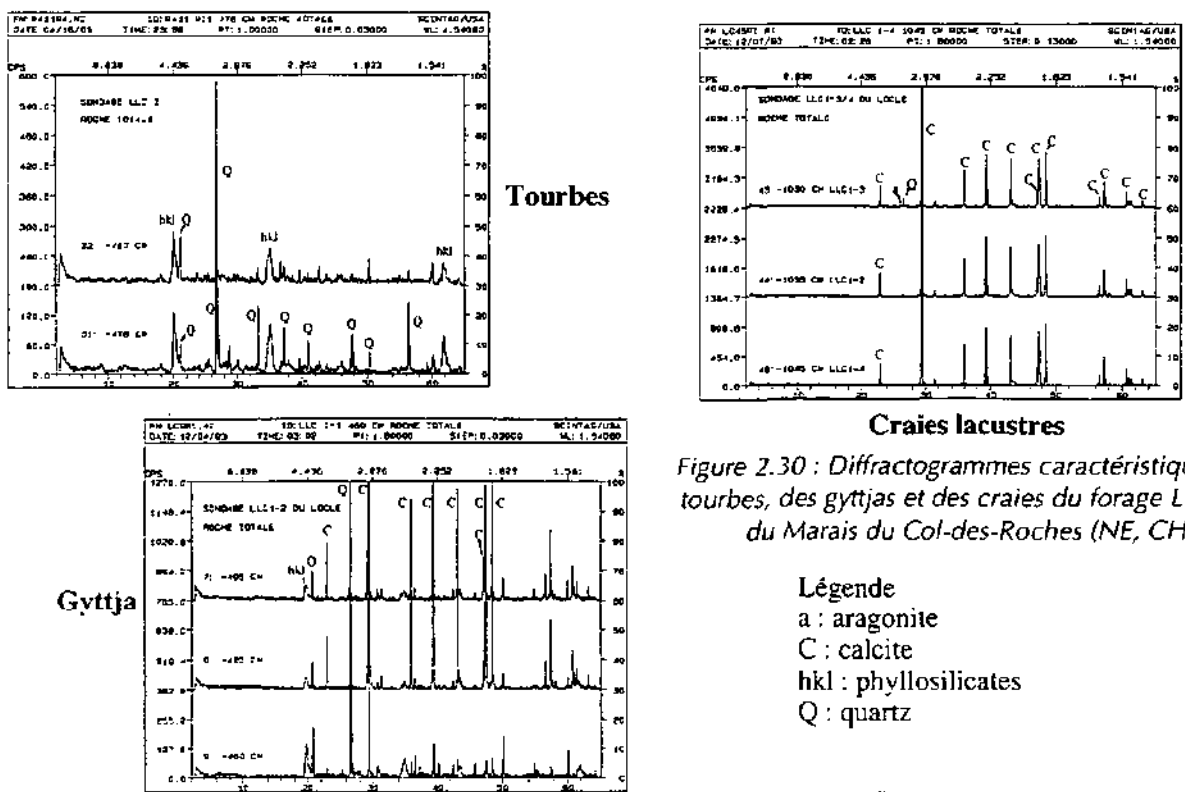
1.1.3. Synthèse

Le traitement mathématique des données permet de donner un caractère moins subjectif aux zones minéralogiques (RT) qui ont été identifiées. On constate en définitive que la zonation obtenue par le traitement statistique confirme les observations qui ont été faites. La composition minéralogique des argiles, des craies, des gyttjas et des tourbes sont détaillées et confirmées par ces analyses.

- Les argiles silteuses grises sont composées de calcite, de dolomite et d'aragonite détritique avec du quartz.
- Les craies lacustres sont composées de calcite et d'aragonite mais sont dépourvues de dolomite.
- Les craies organiques (gyttjas) sont composées de calcite, d'aragonite, de pyrite et de quartz/dolomite.
- Les tourbes sont minéralogiquement caractérisées par la présence de phyllosilicates et de quartz et l'absence totale de calcite.

1.1.4. Étude des minéraux non argileux des forages LLC1-2 à LLC1-5 : description des zones minéralogiques

L'étude porte sur 86 échantillons prélevés entre -1 et -13 m de profondeur sur des carottes extraites avec une sonde russe ne compactant pas les sédiments. Les diffractogrammes de poudres non orientées les plus caractéristiques de trois faciès (tourbes, gyttjas, craies) sont présentés ici (figure 2.30).



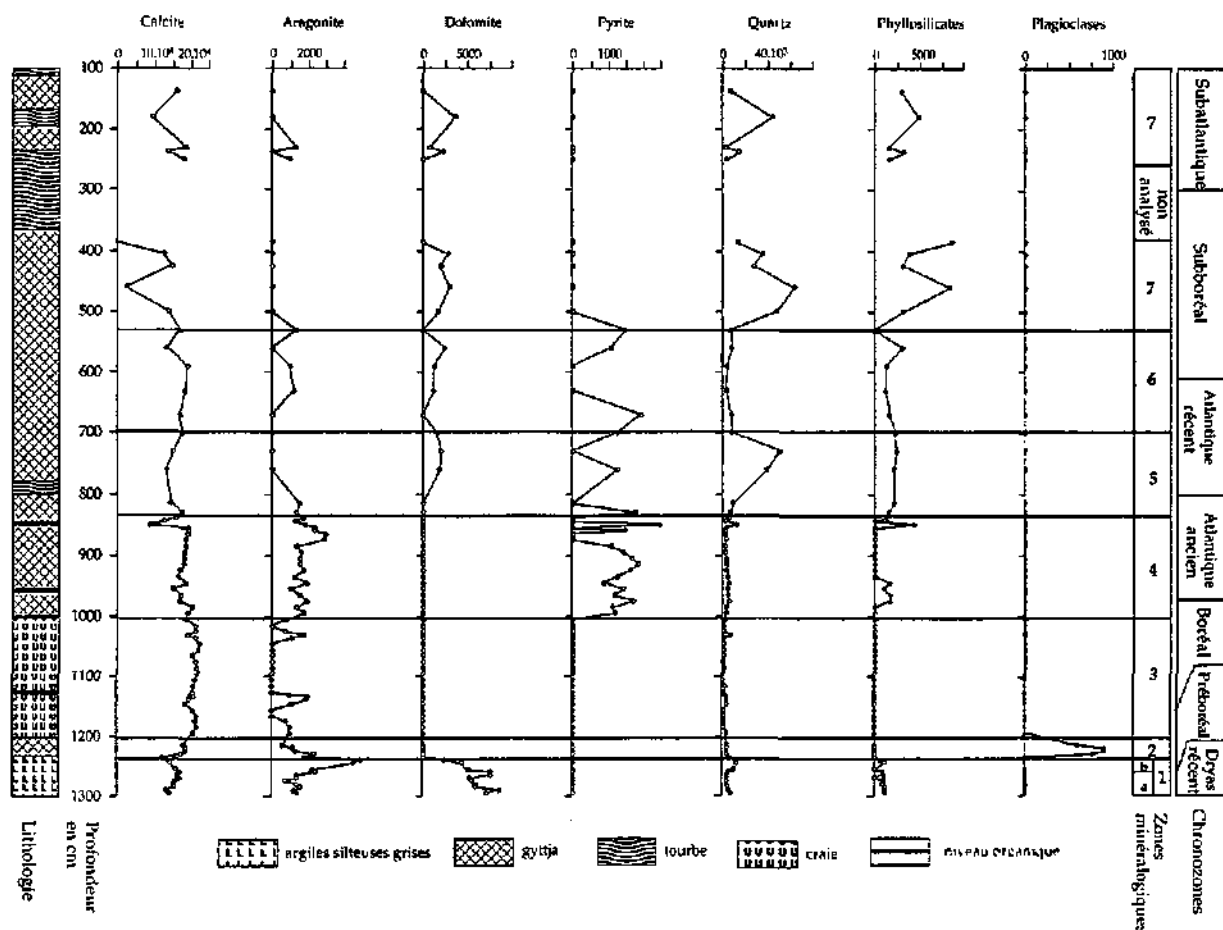


Figure 2.31 : Composition minérale du sédiment total du forage LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) obtenue par diffraction aux rayons X, intensités brutes en CPM (Coups Par Minute)

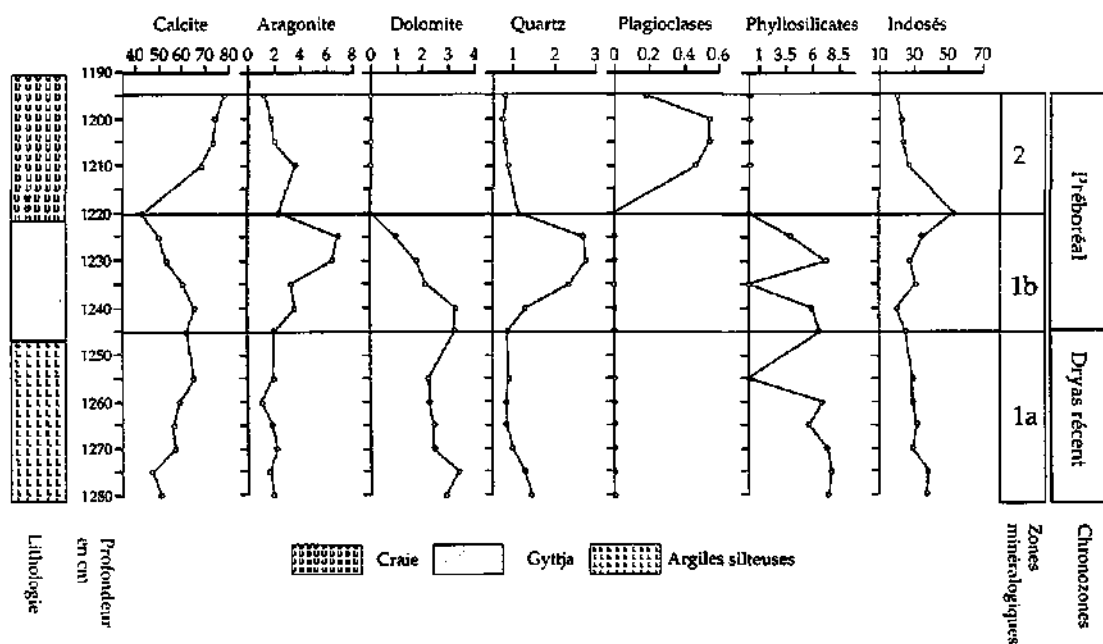


Figure 2.32 : Pourcentages des minéraux du sédiment total en fonction de la profondeur du forage LLC 1-5; détail de la tranche 12/13 m du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

L'analyse a permis de déterminer la composition minéralogique suivante :

- la calcite, l'aragonite et la dolomite ;
- le quartz, les phyllosilicates et les plagioclases ;
- la pyrite.

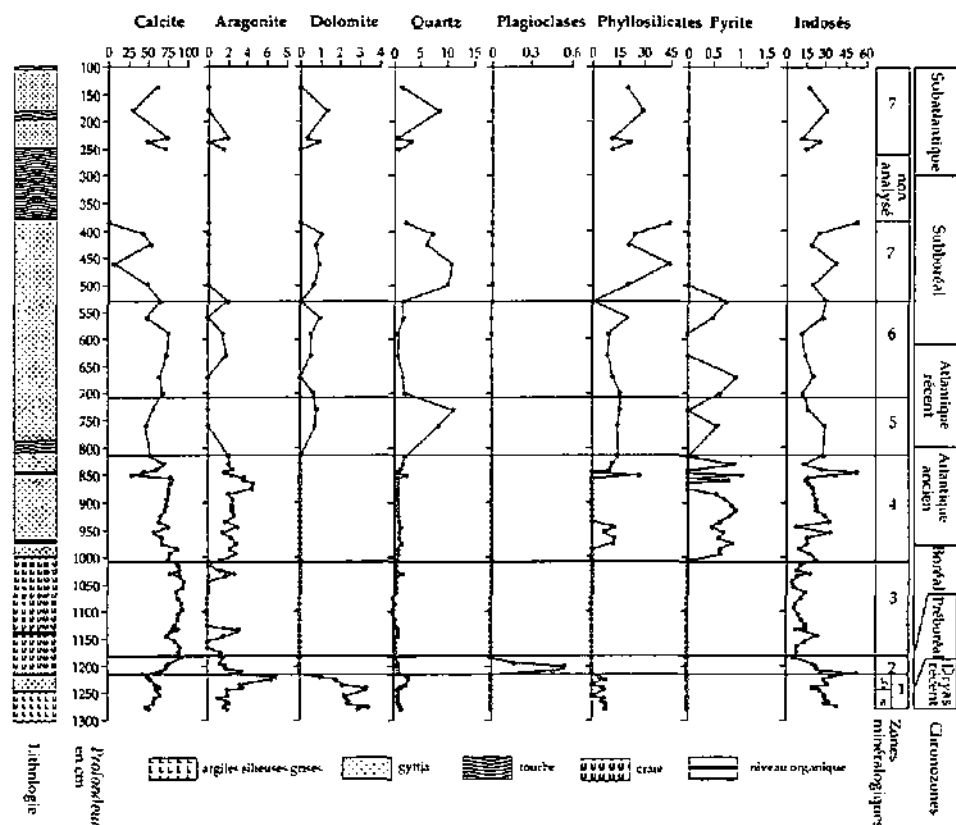


Figure 2.33 : Pourcentages des minéraux du sédiment total en fonction de la profondeur des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

La figure 2.31 permet de suivre la répartition des intensités brutes des pics des minéraux présents, en fonction de la profondeur. Les pourcentages sont reportés sur les figures 2.32 et 2.33. Les données brutes et les pourcentages sont regroupés dans les annexes n° 18 et 19. Les variations observées permettent de définir 7 zones minéralogiques principales notées RT1 à RT8 et décrites en annexe n° 20.

La figure 2.32 montre un agrandissement de la base du forage LLC 1-2 à 5 (entre 11 et 13 m de profondeur). Cet agrandissement permet de subdiviser la zone RT1 (calcite, dolomite et aragonite) en 2 sous-zones :

1.1.5. Traitement statistique des données du forage LLC 1-2 à 5

La figure 2.34 donne les résultats du traitement statistique des pourcentages des minéraux du sédiment total des forages LLC 1-2 à 5. Six zones ont pu être mises en évidence à partir de la contribution des échantillons. Le passage de la sédimentation détritique (argiles silteuses et gyttjas, zones 1 et 2 en gris clair) à la sédimentation autochtone (craies, zone 3 en gris plus foncé) est très bien caractérisé par des contributions opposées. La

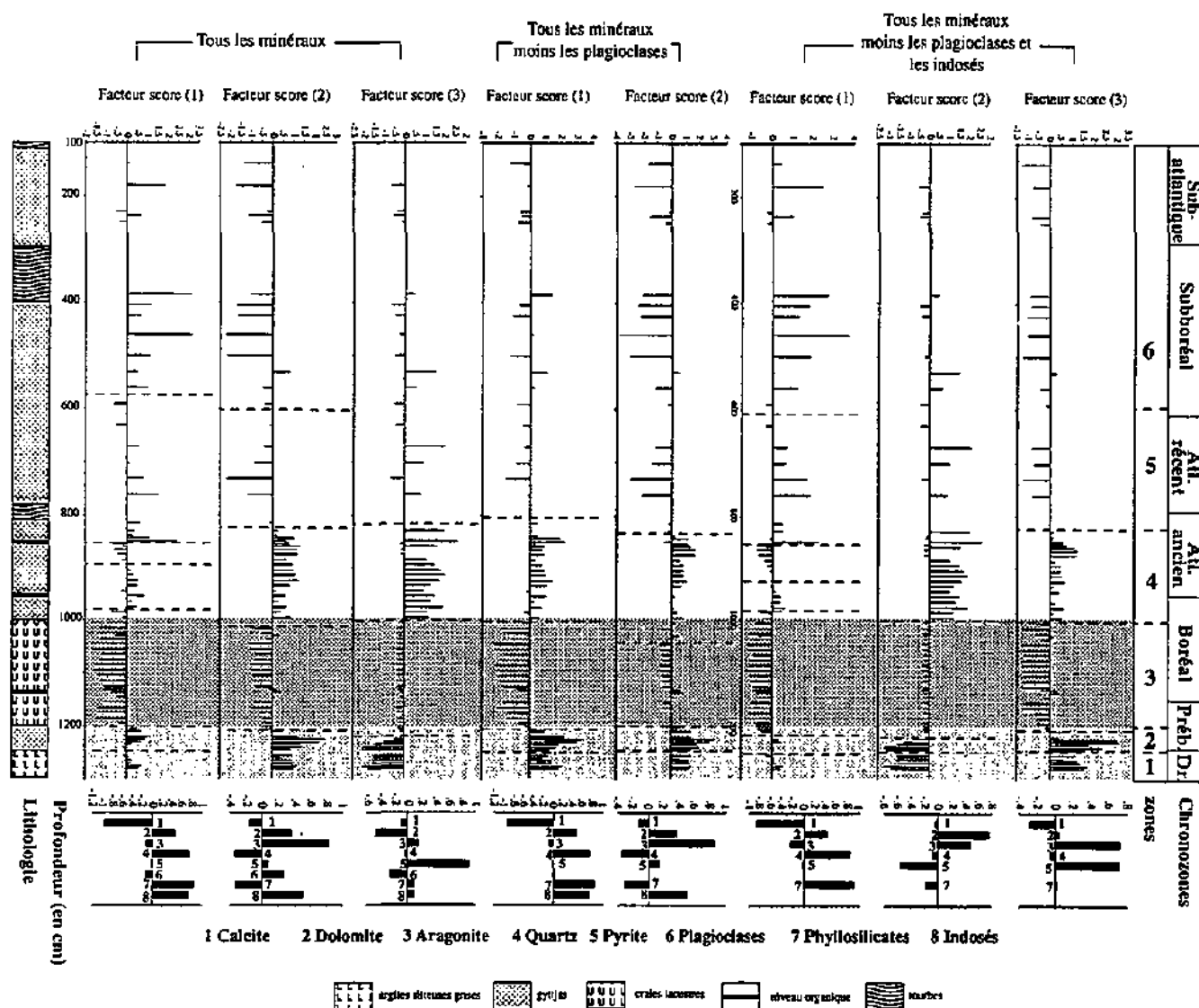


Figure 2.34 : Analyse factorielle en Composantes Principales des pourcentages des minéraux du sédiment total du forage LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

séquence de craie lacustre, moins détritique, (zone 3) est identifiée par des limites de contribution très contrastées et homogènes. Le passage aux craies organiques est également très net (limite entre les zones 3 et 4). En revanche, la limite entre les zones 4 et 5, comme celle entre les zones 5 et 6, sont plus difficilement identifiables. Ces limites correspondent au passage entre les craies organiques et les alternances de gytjas/tourbes d'une part et au passage entre ces faciès et les tourbes. Les analyses de ce forage confirment ce qui a été observé auparavant. La distinction entre les craies, les craies organiques et les gytjas est plus aisée.

1.1.6. Étude des minéraux non argileux et description des zones minéralogiques du forage LLC 2

L'analyse diffractométrique porte sur 82 échantillons. La composition minéralogique des sédiments de ce forage est sensiblement la même que celle des forages précédents : dolomite, calcite et aragonite ; feldspaths potassiques, quartz et phyllosilicates.

Deux diffractogrammes typiques obtenus à l'issue de ces analyses sont reportés sur la figure 2.35. La figure 2.36 donne les intensités brutes de ces minéraux. Les données de base sont en annexes n° 21 et 22 La composition minérale de ce forage se distingue par l'absence de la pyrite et des plagioclases. La variation des pourcentages des minéraux présents dans le sédiment permettent de distinguer deux zones minéralogiques décrites en annexe n° 23 (figure 2.37):

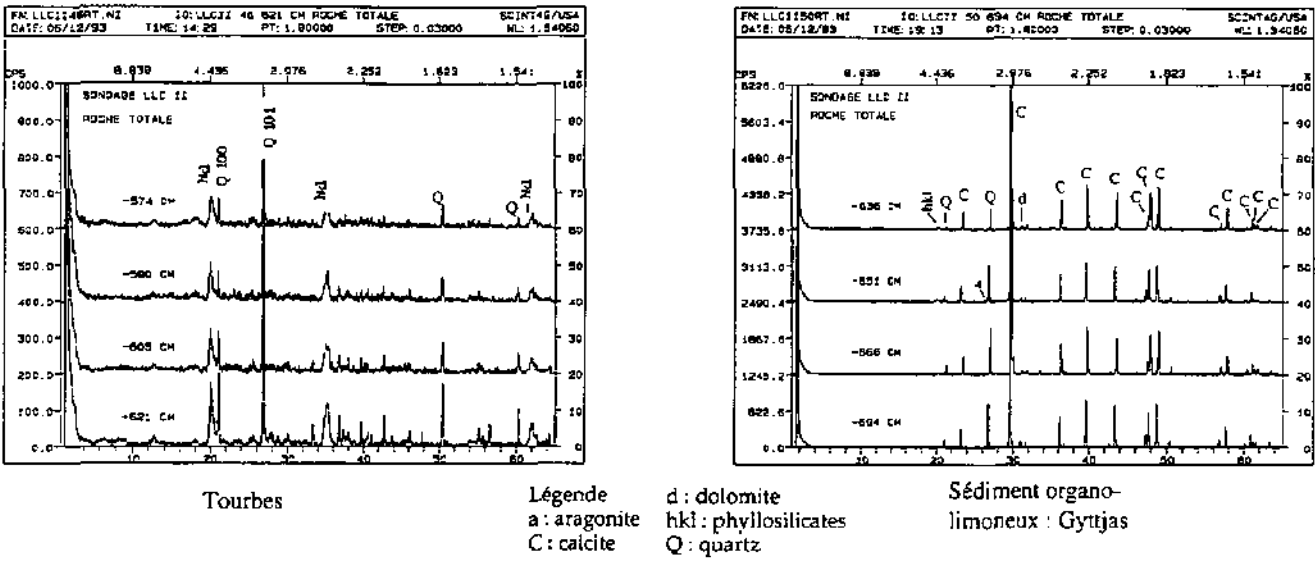


Figure 2.35 : Diffractogrammes caractéristiques de deux unités sédimentaires du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

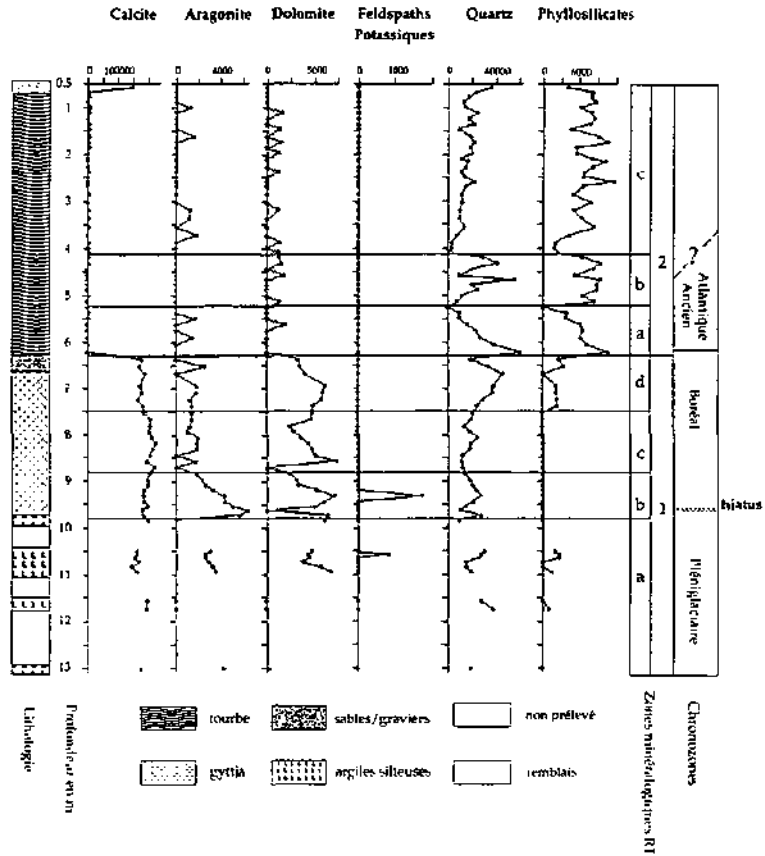


Figure 2.36 : Composition minéralogique des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) d'après la diffraction aux rayons X, Intensités brutes en Coups Par Minute (CPM)

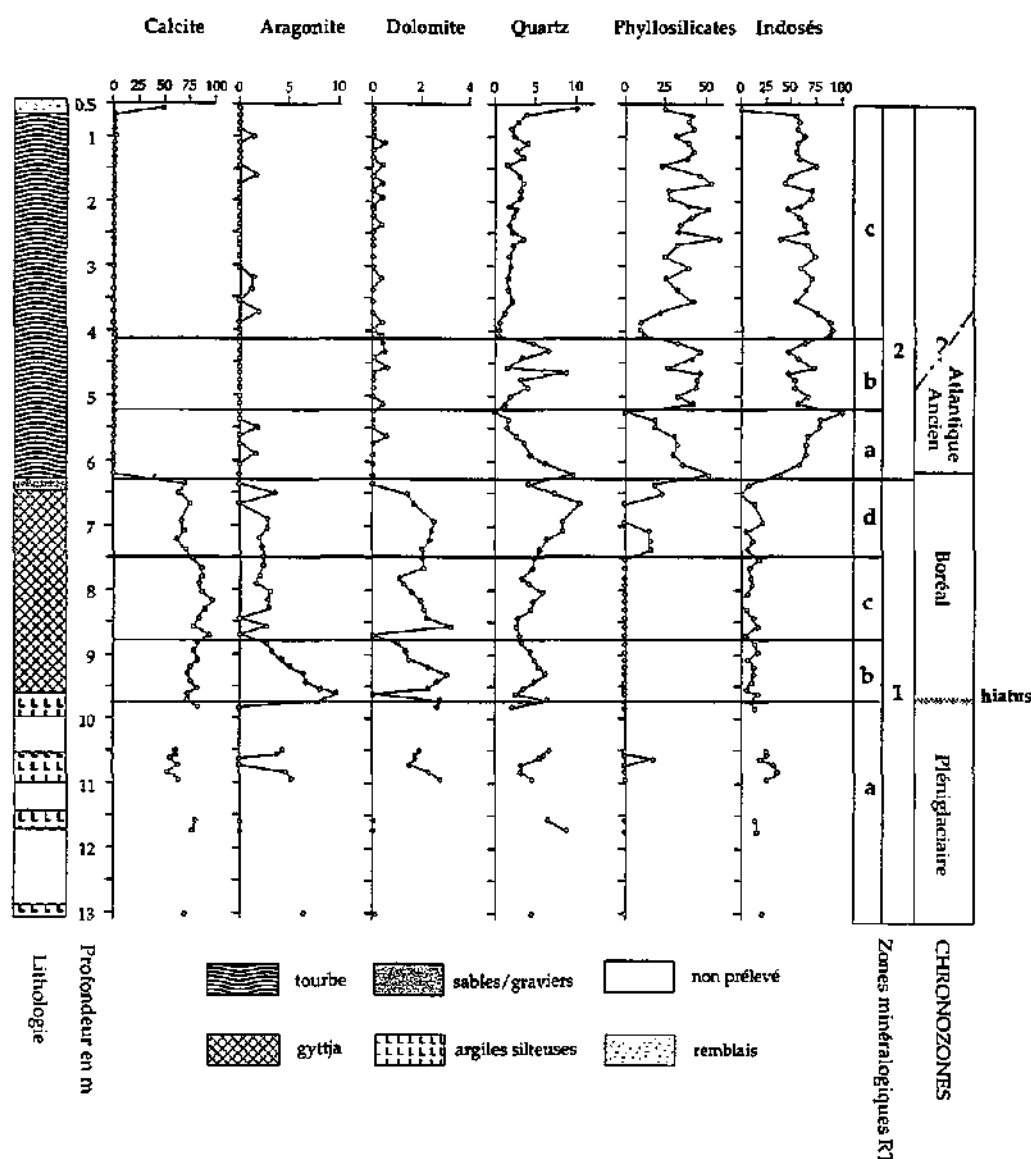


Figure 2.37 : Pourcentages des minéraux des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

1.1.7. Traitement statistique des données

Pour ce forage, nous avons également comparé les contributions de chaque échantillon pour différentes variables. Trois limites de contribution sont clairement identifiées dans ce forage (figure 2.38).

Chaque faciès sédimentologique (argiles silteuses grises (1), gytjas (2) et tourbes (4)) est statistiquement bien repéré sur les facteurs 2 et 1 (sans les indosés). En revanche, le facteur 1 et le facteur 2 (excluant les indosés) montrent une opposition très marquée entre les faciès argileux, les gytjas d'une part et les sables/graviers et les tourbes d'autre part. Les variables phyllosilicates et quartz ont dans ce cas un poids important qui ne permettent pas de séparer sûrement les gytjas des argiles silteuses, mais différencient précisément les tourbes.

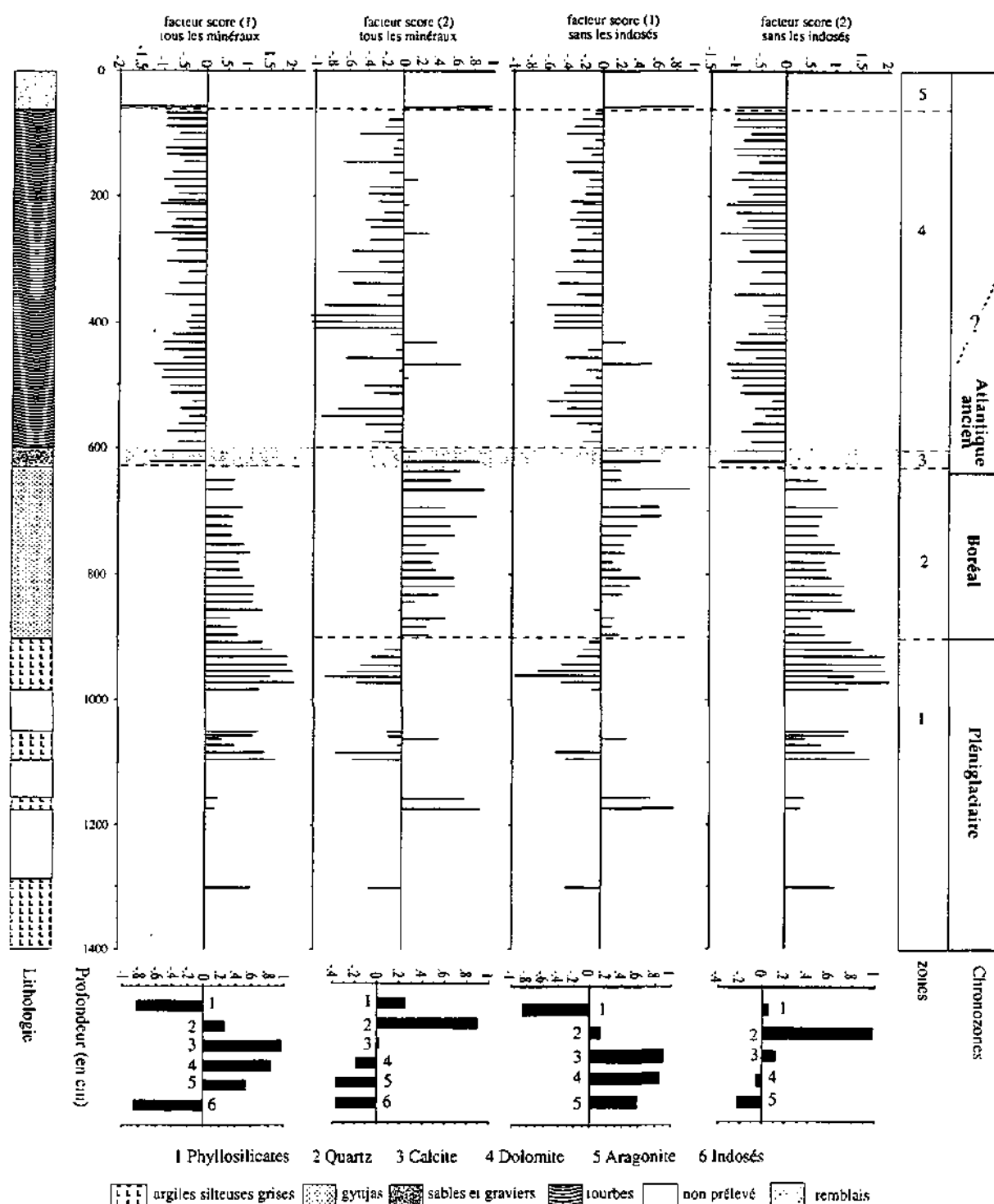


Figure 2.38 : Analyse factorielle en Composantes Principales sur les pourcentages des minéraux présents dans le sédiment total du forage LLC2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

Statistiquement, on remarque que le mélange de sables et de graviers (zone 3) apparaît soit avec les argiles silteuses et les gyttjas, soit avec les tourbes. Ceci peut s'expliquer par la composition minéralogique de ce sédiment : il contient tous les types de minéraux.

Dans tous les cas, l'échantillon supérieur (zone 5) se démarque des autres par sa composition minérale (remblais) et la contribution de cet échantillon est toujours opposée aux autres dans les différents facteurs (zone 4).

Forage LLC1		Forages LLC1-2 à 5		Forage LLC2	
6	Calcite, dolomite, quartz, phyllosilicates	8	Phyllosilicates, Calcite, quartz		
5	Quartz, phyllosilicates	7	Phyllosilicates, quartz	2	Phyllosilicates, quartz
4	Calcite, dolomite, quartz, phyllosilicates	6	Calcite, aragonite, dolomite		
3	Calcite, aragonite, dolomite	5	Calcite, quartz, phyllosilicates		
		4	Calcite, aragonite, pyrite		
2	Calcite	3	Calcite		
		2	Calcite, plagioclases		
e d c b a	Calcite, dolomite, aragonite	1	Calcite, dolomite, aragonite	1	Calcite, dolomite, aragonite

Figure 2.39 : Comparaison des zones minéralogiques des trois forages du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

1.1.8. Comparaison des zones minéralogiques des trois forages : les associations minéralogiques

La figure 2.39 montre les correspondances existant entre les zones minéralogiques définies dans les trois forages. Bien que relativement contrastées les zones minéralogiques identifiées dans ces trois forages relatent nécessairement une évolution commune de la composition sédimentaire dont l'expression varie d'un forage à un autre. Les aires grisées matérialisent les informations qui ne sont pas renseignées dans les forages.

- La zone minéralogique RT 1, constituée par l'association minéralogique calcite-dolomite-aragonite, domine les 28 mètres de la base du forage LLC1. Elle est beaucoup moins développée dans le forage LLC 2, sur seulement 4 mètres. Les forages LLC 1-2 à 5 ont été réalisés pour étudier dans le détail la séquence holocène, il est donc logique que la partie profonde ne soit pas aussi documentée.

- Les zones minéralogiques RT 2 et RT 4 des forages LLC1-2 à 5 sont uniques. Il n'y a pas de zone minéralogique à calcite majoritaire dans le forage LLC 2. Dans ce forage, les sous-zones RT1 c et d ont des pourcentages de calcite élevés, mais ce minéral est accompagné de la dolomite et du quartz. On observe une bonne correspondance entre les zones RT 2 (LLC 1) et RT 3 (de LLC 1-2 à 5) où la calcite est majoritaire.

Dans les trois forages, on différencie très bien l'association minéralogique constituée par le quartz et les phyllosilicates. Elle est très développée dans le forage LLC 2 (zone RT 2).

1.1.9. Synthèse

- Les argiles silteuses grises (sédiment glacio-lacustre) avec des niveaux de sables et/ou de graviers (cf. chapitre 1 de cette seconde partie, et annexes 3 et 4) sont caractérisées minéralogiquement par l'association calcite-dolomite-aragonite (zones RT1).

- La craie lacustre est caractérisée dans les zones RT2, RT3 des forages LLC1 et LLC 1-2 à 5 par deux associations minéralogiques :

- un ensemble à calcite majoritaire ; ce n'est pas véritablement une association puisque la calcite est quasiment le seul minéral présent ;

- une association à calcite, aragonite et pyrite.

- Les craies brunes que nous avons en partie appelé gyttjas se caractérisent par une association à calcite, aragonite et dolomite.

- Les véritables gyttjas que l'on rencontre dans les zones RT4/6 et RT 5/6/7 sont caractérisées par l'association minérale calcite-aragonite-dolomite avec du quartz et des phyllosilicates.

- Les tourbes sont minéralogiquement très bien identifiées ; on y trouve essentiellement l'association quartz-phyllosilicates.

La matière organique a un coefficient d'absorption atomique très faible, elle est comme transparente aux rayons-X, les minéraux présents sont donc mieux mis en évidence. Le pourcentage des indosés révèle en partie la quantité de matière organique qui n'est pas diffractée, mais également la présence de phyllosilicates.

La limite supérieure des zones RT1 correspond à la fin du Pléniglaciaire-Tardiglaciaire dans les trois forages. Cette limite peut être considérée comme une limite isochrone.

Les autres zones et associations minéralogiques n'ont pas cet intérêt. La présence de dolomite est, pour l'Holocène, un indicateur de détritisme (dans le sédiment total) dès la fin de l'Atlantique ancien dans le forage LLC1.

La succession des associations minéralogiques traduit une évolution dans la sédimentation depuis la base jusqu'au sommet du forage. Le remplissage de la cuvette lacustre débute par un sédiment détritique recouvert par un sédiment autochtone (craie ou tourbe). Ainsi, par le seul biais de l'analyse minérale d'une poudre provenant du marais, il est possible de retrouver le faciès sédimentaire auquel elle appartient en comparant les minéraux déterminés avec les associations minérales de ces différents faciès.

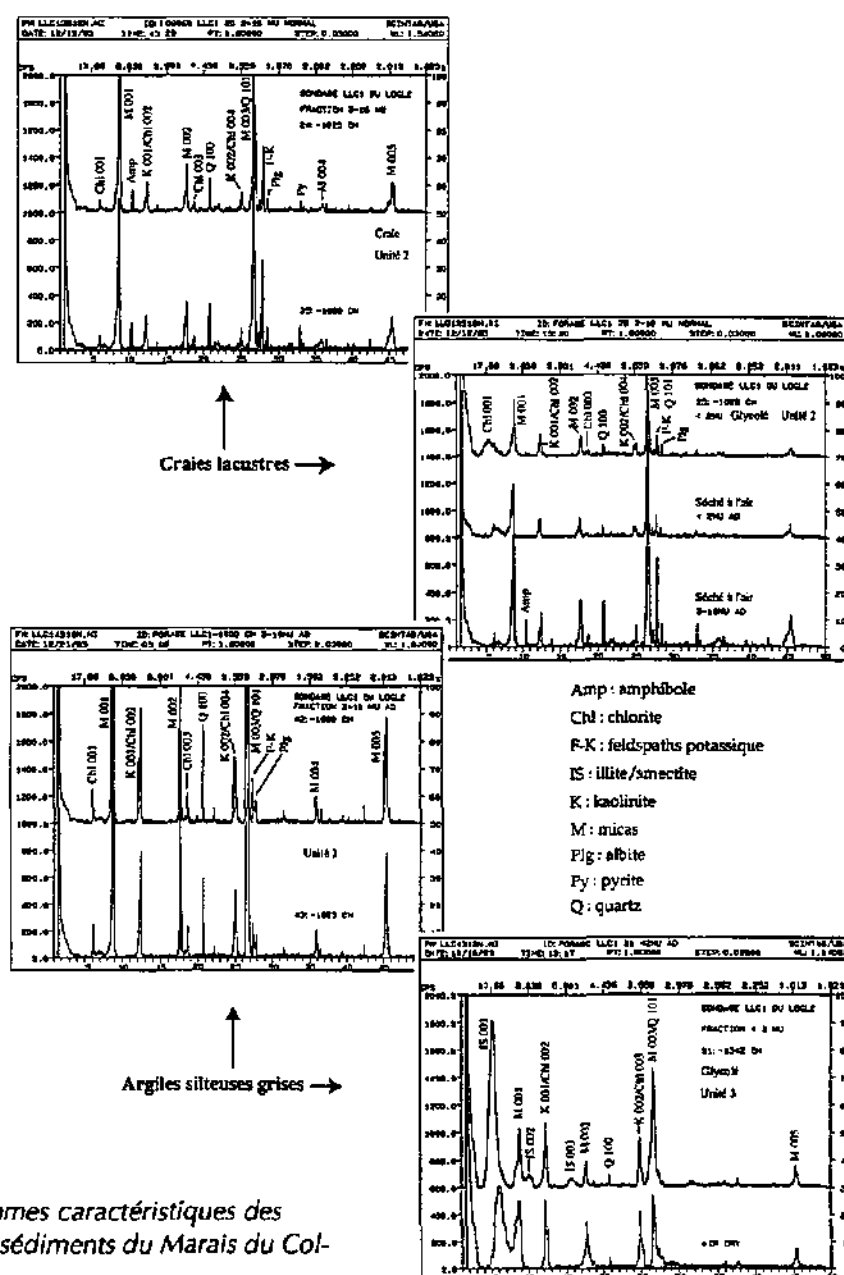


Figure 2.40 : Diffractogrammes caractéristiques des préparations orientées des sédiments du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

1.2. MINÉRALOGIE DES FRACTIONS MINÉRALES ARGILEUSES < 2 µm ET 2 - 16 µm

La seconde étape de l'analyse minérale consiste à inventorier les minéraux de la fraction argileuse ou résidu insoluble (cf première partie au chapitre 1 § 3.3.2.4 et 3.3.2.5). L'étude consiste à identifier les phyllosilicates et à suivre leur répartition dans les fractions < 2 µm et dans la fraction 2-16 µm. Pour servir de référentiel, des échantillons provenant des formations du bassin versant ont été analysés.

1.2.1. La fraction minérale argileuse < 2 µm du forage LLC 1

Cette étude a porté sur 66 échantillons prélevés entre - 41 m et - 10 m de profondeur. La figure 2.40 montre des diffractogrammes caractéristiques de chaque faciès sédimentaire

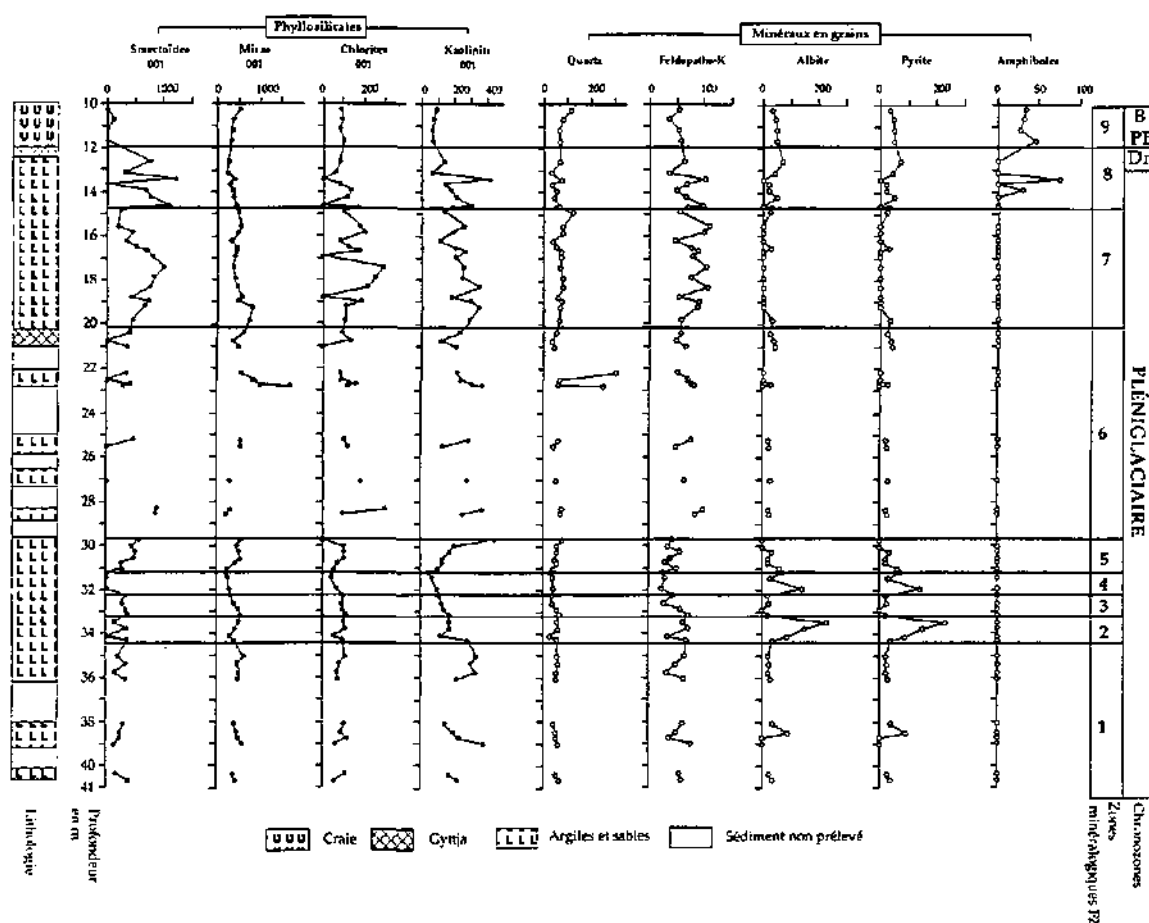


Figure 2.41 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse < à 2 µm glycolée des sédiments compris entre 10 et 41 m dans le forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

obtenus lors des analyses des fractions granulométriques. Les minéraux phylliteux sont par ordre décroissant d'intensité représentés par les smectoides (smectite-illite), les micas, la kaolinite et la chlorite. Les smectoides sont des minéraux gonflants de la fraction < 2 µm qui passent de 16 à 17 Å après traitement au glycol ; ils contiennent entre 70 et 80 % de couches gonflantes.

Les minéraux en grains ne sont pas différents de ceux qui constituent le sédiment total ; leurs intensités sont très inférieures à celles des argiles et sont par ordre décroissant d'intensité représentés par le quartz, les feldspaths, l'albite, la pyrite et les amphiboles.

Les intensités brutes des minéraux varient en fonction de la profondeur de prélèvement des échantillons (figure 2.41). Les données brutes se trouvent dans les annexes n° 24. On distingue une zone principale à smectoides entre 41 et 12 mètres de profondeur qui peut être subdivisée en 8 sous-zones et une zone à amphiboles décrites en annexe n° 25. Les zones sont intitulées F2- suivi du numéro de la zone (F : pour fraction, 2 : pour < 2 µm).

1.2.2. Description des zones de la fraction minérale argileuse 2-16 µm du forage LLC 1

Le cortège minéralogique de la fraction granulométrique décarbonatée comprise entre 2 et 16 µm se distingue de celui de la fraction < à 2 µm par la présence de paragonite parmi

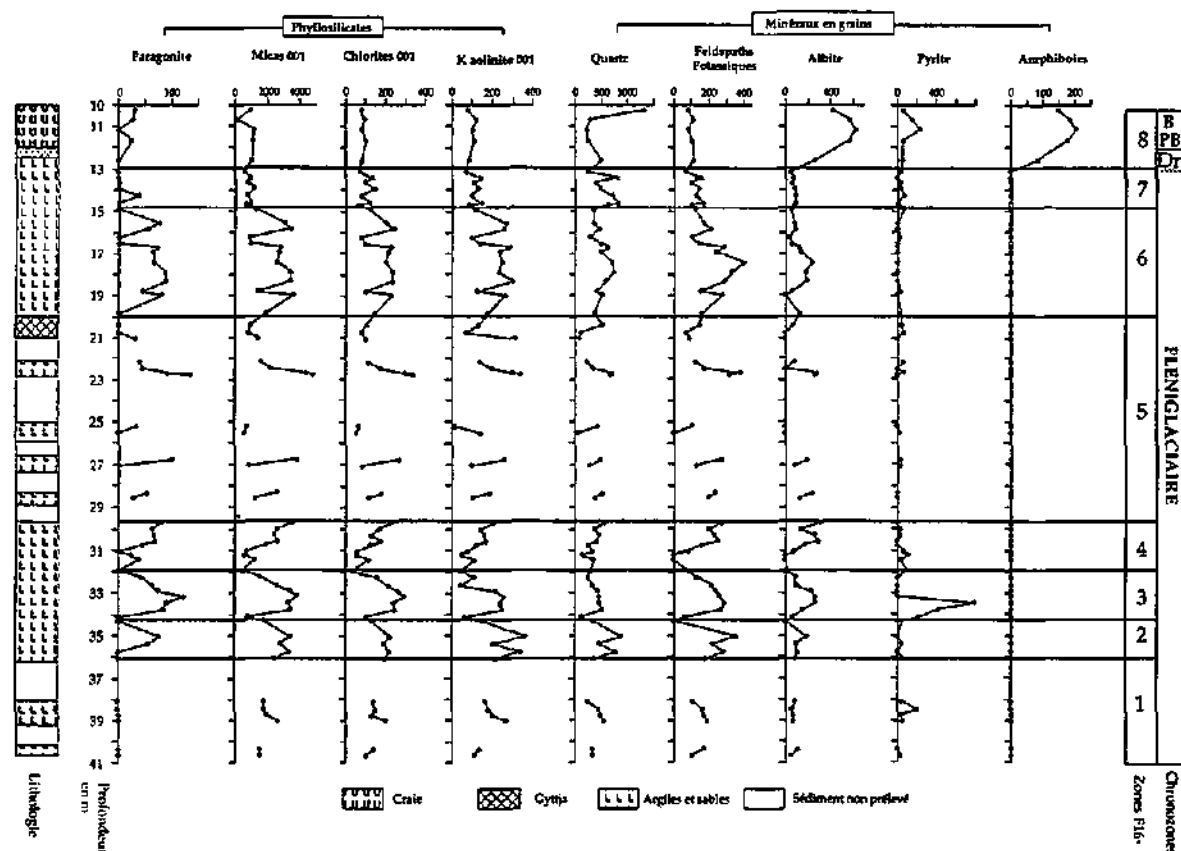


Figure 2.42 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse 2-16 µm des sédiments compris entre 10 et 41 m dans le forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

les phyllosilicates (figure 2.42) ; les intensités brutes sont en annexe n° 26. Le cortège minéralogique des minéraux en grains comprend également le quartz, les feldspaths potassiques, les plagioclases, la pyrite et les amphiboles ; leurs intensités brutes sont nettement supérieures à celles de la fraction < 2 µm. Par ordre décroissant d'intensité on trouve les micas, le quartz, la chlorite, la kaolinite, les feldspaths potassiques, l'albite, la pyrite, les amphiboles et la paragonite.

Le principal changement observé dans cette fraction concerne l'apparition plus tardive des amphiboles dans le sédiment (à - 13 m), elle était identifiée à - 14.50 m dans la fraction < 2 µm.

On remarque l'absence de paragonite en dessous de 36 m de profondeur. Au dessus de 14 m, sa présence est sporadique et les intensités relevées sont faibles. Les zones F16-2, F16-3 et F16-4 correspondent à des zones où les intensités des argiles et des minéraux en grains sont en hausse. Entre chacune de ces zones on observe une diminution des intensités brutes de tous les minéraux. Dans ces trois zones, les intensités brutes de la pyrite varient différemment. On retrouve, comme dans la fraction < 2 µm, une zone où la pyrite montre des intensités nettement plus élevées (zone F16-3).

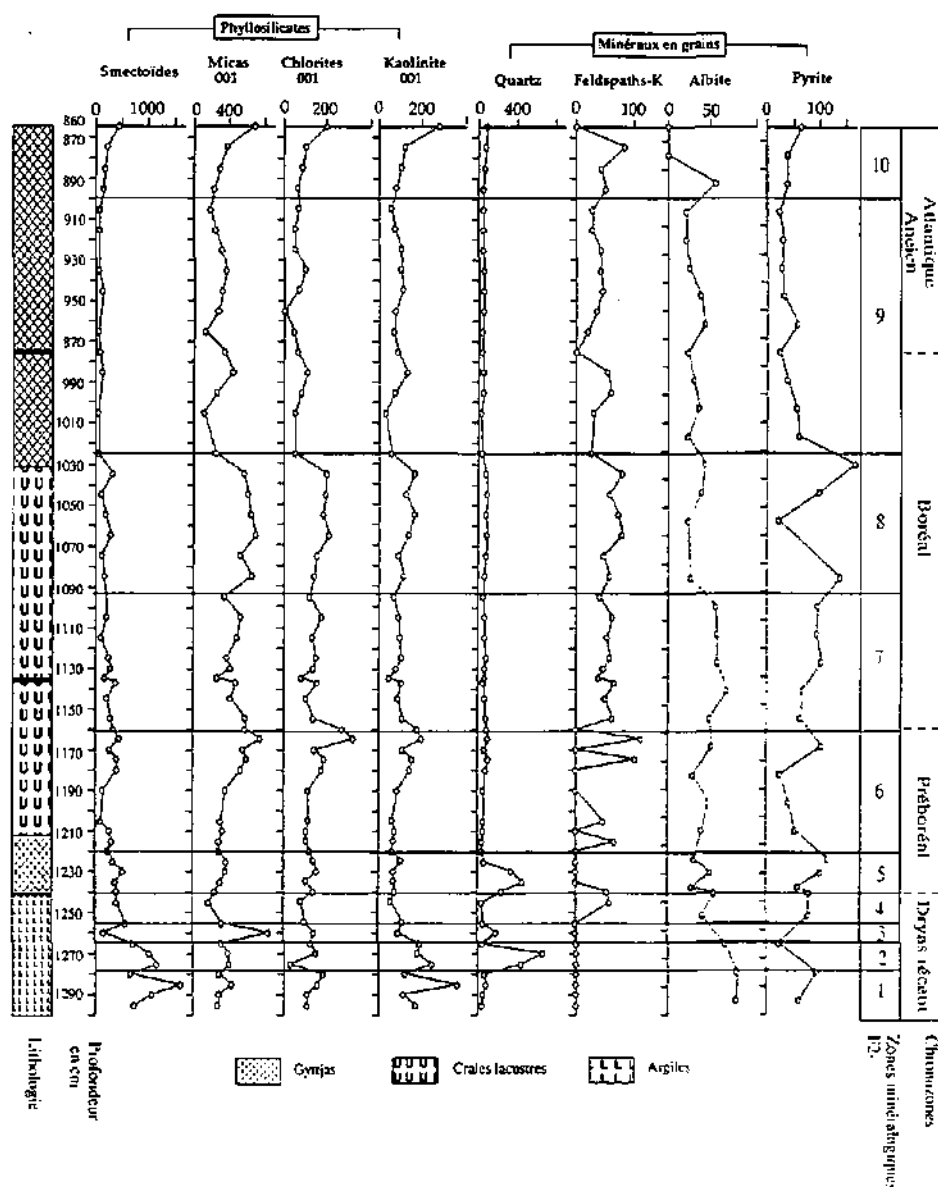


Figure 2.43 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse < 2 μm glycolée des sédiments des forages LLC 1-3 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

1.2.3. Étude de la fraction argileuse et des minéraux en grains < 2 μm des forages LLC 1-3/4 et 5

Les variations des intensités brutes (annexe n° 27) sont reportées sur la figure 2.43. La composition minéralogique de cette fraction argileuse est sensiblement comparable à celle rencontrée dans le forage LLC 1 (figure 2.41). 54 échantillons ont été traités ; ils concernent les sédiments compris entre - 13 et - 8.60 m de profondeur.

Les phyllosilicates sont représentés par des smectoides (smectite-illite), des micas, des chlorites et de la kaolinite.

Les minéraux en grains sont essentiellement composés de quartz, de feldspaths potassiques, d'albite et de pyrite ; les amphiboles n'ont pas été identifiées dans ce forage. La zonation minéralogique conduit à distinguer 10 zones détaillées dans l'annexe n° 28 (figure 2.43).

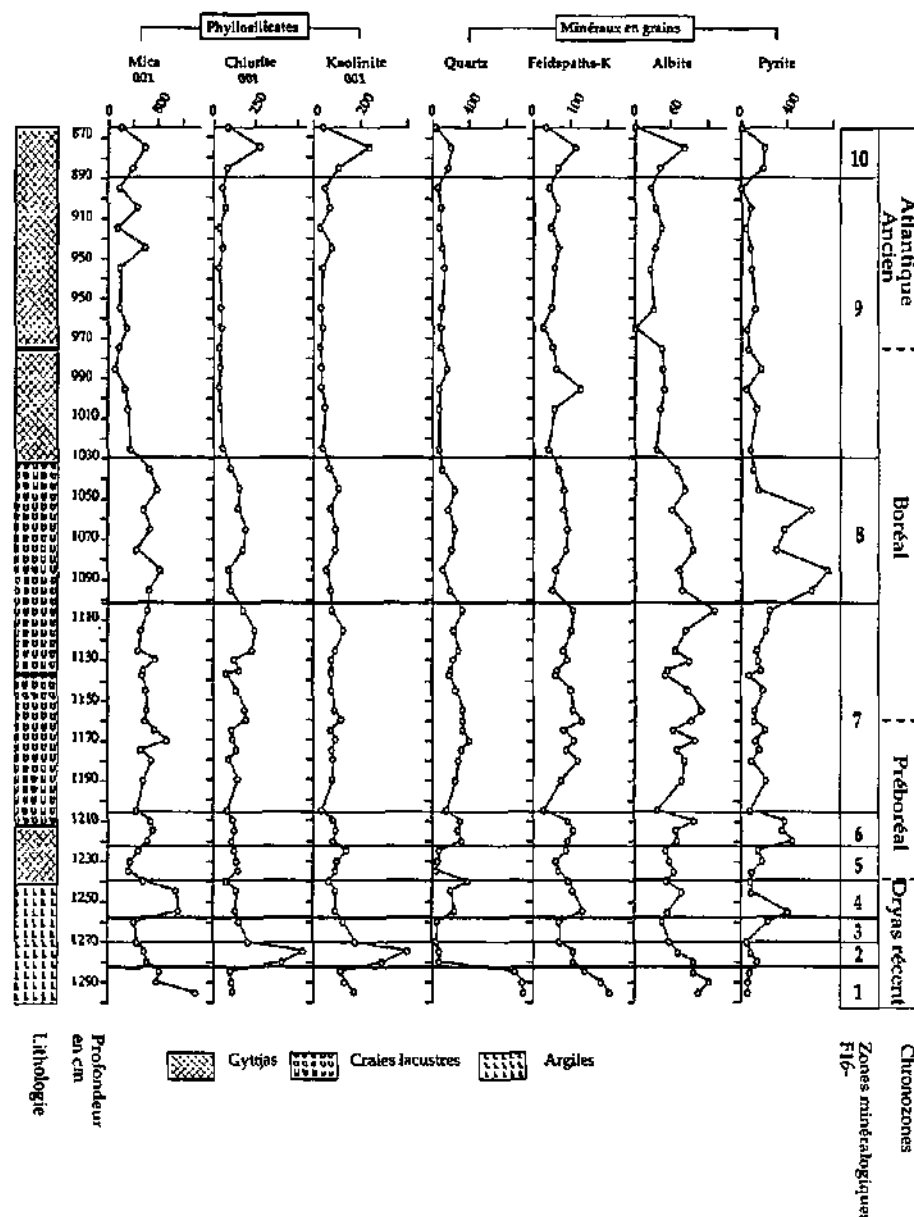


Figure 2.44 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse 2-16 µm non glycolée des sédiments des forages LLC 1-3 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

1.2.4. La fraction minérale argileuse 2-16 µm des forages LLC1-3/4 et 5

La figure 2.44 montre que la zonation minéralogique (annexe n° 30) de la fraction 2-16 µm est quasiment identique à celle de la fraction < 2 µm. La paragonite ne figure pas parmi les argiles minérales et l'amphibole n'est pas identifiée parmi les minéraux en grains. Les intensités brutes (annexe n° 29) de l'albite sont très inférieures à celles qui ont été relevées dans le forage LLC1.

Les intensités brutes des micas sont plus élevées ; celles de la chlorite et de la kaolinite sont comparables. Les minéraux en grains ont des intensités brutes légèrement supérieures à celles de la fraction < 2 µm. Les zones différentes seront détaillées ci-dessous. La zonation utilisée est : zone F16 suivi du numéro de la zone.

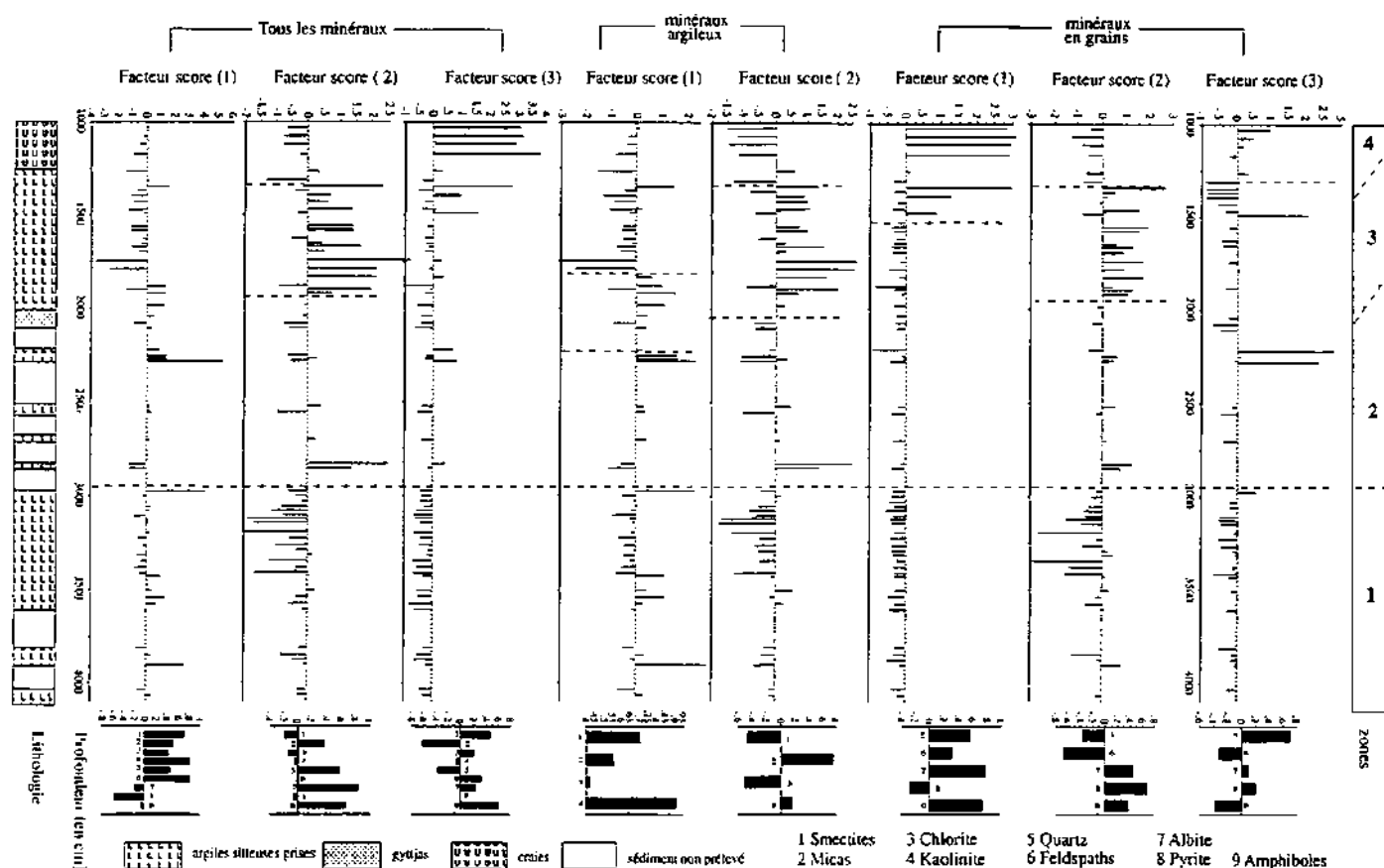


Figure 2.45 : Analyse factorielle en Composante Principales des données des intensités brutes des minéraux de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ glycolée du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches

1.2.5. Traitement statistique des données de la minéralogie des fractions granulométriques $< 2 \mu\text{m}$ et $2-16 \mu\text{m}$

Nous avons essayé de traiter les données brutes issues de la diffraction des plaques orientées. Les données brutes sont dans les annexes 24, 26, 27 et 29. L'Analyse factorielle en Composantes Principales a été menée tout d'abord sur les intensités de tous les minéraux, sur les intensités des minéraux argileux, puis sur les intensités des minéraux en grains. Les échantillons correspondent aux observations et les minéraux aux variables.

1.2.5.1. Les fractions granulométriques $< 2 \mu\text{m}$ glycolées

Trois limites de contribution, séparant 4 zones, sont bien définies dans le forage LLC1 (figure 2.45). La zone qui contient des amphiboles (zone 4) est en particulier bien individualisée même lorsque l'on ne s'intéresse qu'aux minéraux argileux. La base du forage LLC1, zone 1 entre 30 et 41 m de profondeur, est dans tous les cas clairement identifiée.

A l'opposé, les résultats des analyses des forages LLC1-2 à 5 montrent des contrastes plus marqués entre les différentes limites de contribution (figure 2.46). Huit zones sont mises en évidence entre 13 et 8.60 m de profondeur ; les zones 1, 2, 3 et 4 sont les plus marquées.

Il n'est pas possible de faire le lien entre le forage LLC1 et les forages LLC 1-2 à 5 que ce soit par comparaison des zones minéralogiques de la fraction granulométrique ou par le

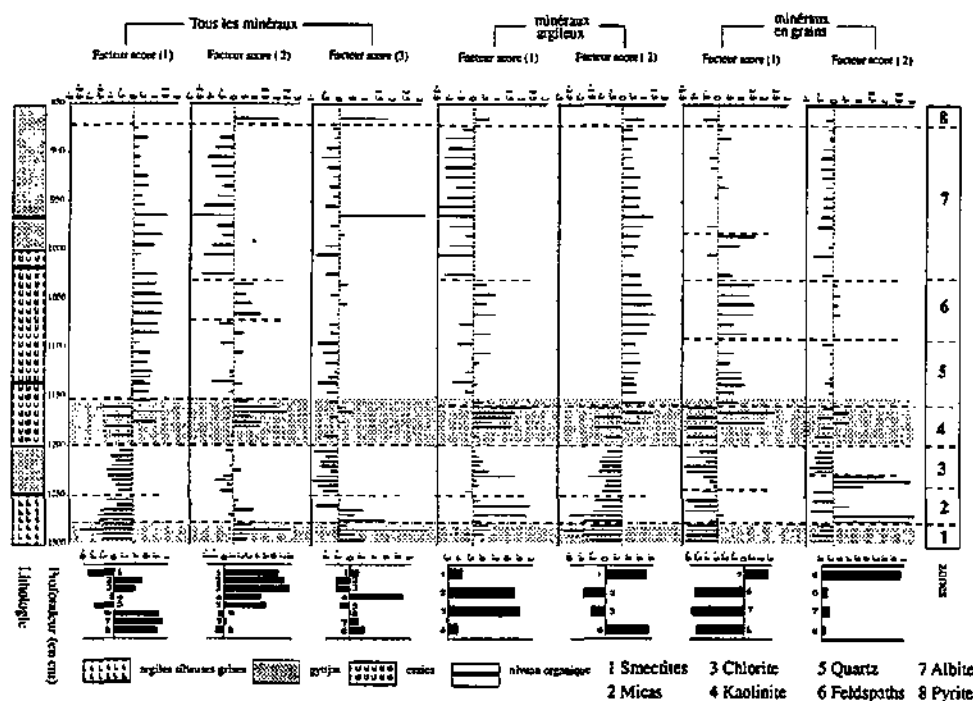


Figure 2.46 :
Analyse
factorielle en
Composante
Principales des
données des
intensités brutes
des minéraux
de la fraction <
2 μ m glycolée
des forages LLC
1-2 à 5 du
Marais du Col-
des-Roches

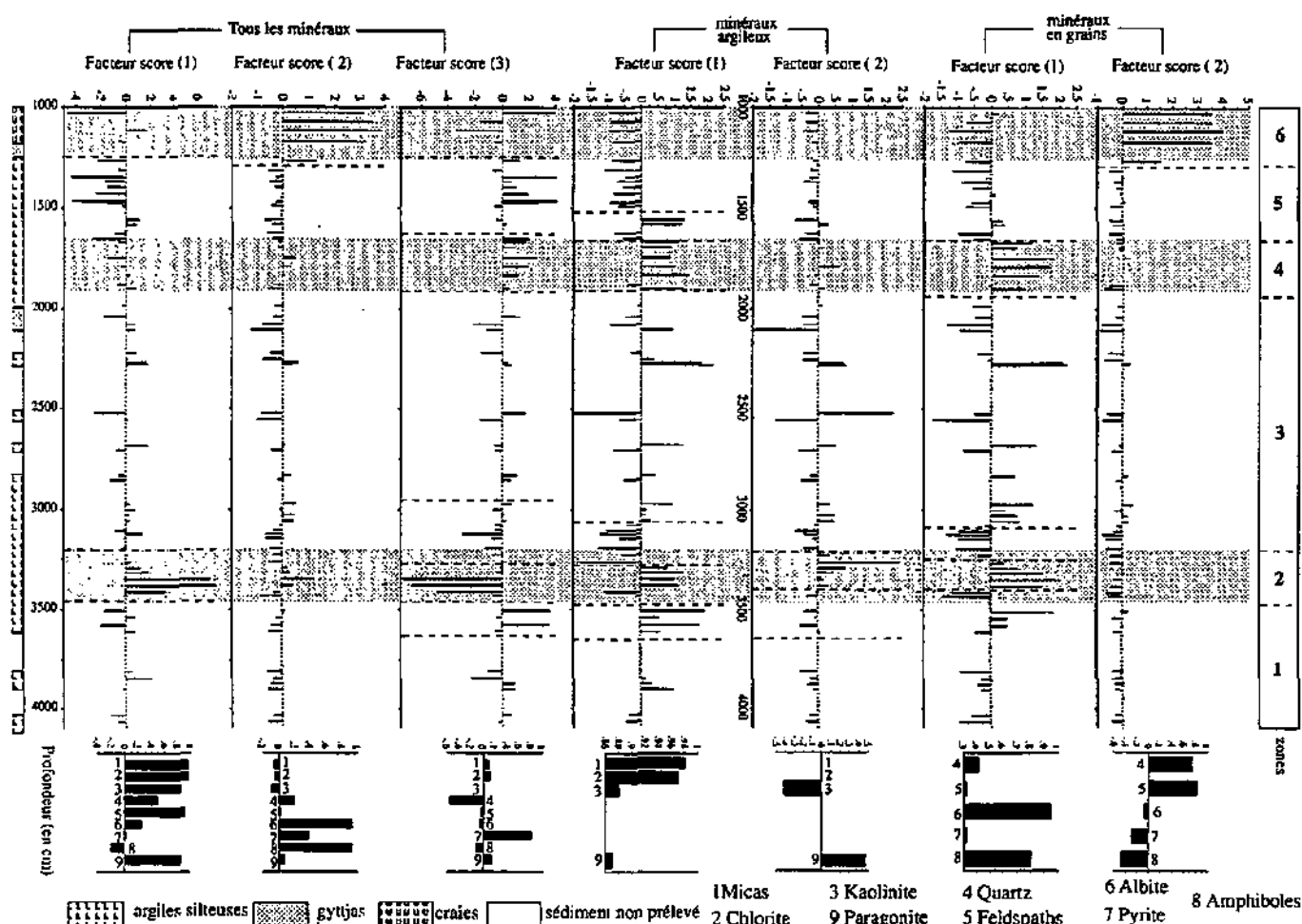


Figure 2.47 : Analyse factorielle en Composantes Principales des données des intensités brutes des minéraux de la fraction 2-16 μ m du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches

traitement mathématique des données. On pensait que le fait de traiter séparément les minéraux argileux des minéraux en grains allait apporter des éléments de réponses ; or, il n'en est rien. Il ne fallait peut-être ni travailler sur les données brutes ni choisir l'Analyse factorielle en Composantes Principales pour traiter ces données. Gindraux et Kübler (1989) s'étant heurtés à des problèmes comparables avaient préféré l'Analyse Factorielle des Correspondances selon Benzécri. Mais, il faut également rappeler que l'analyse des données permet de décrire un tableau de données tel qu'il est et qu'elle ne permet pas d'en tirer automatiquement des lois géologiques ou autres (Bouroche, Saporta, 1989 ; Gindraux, Kübler, 1989 ; Dean, 1993).

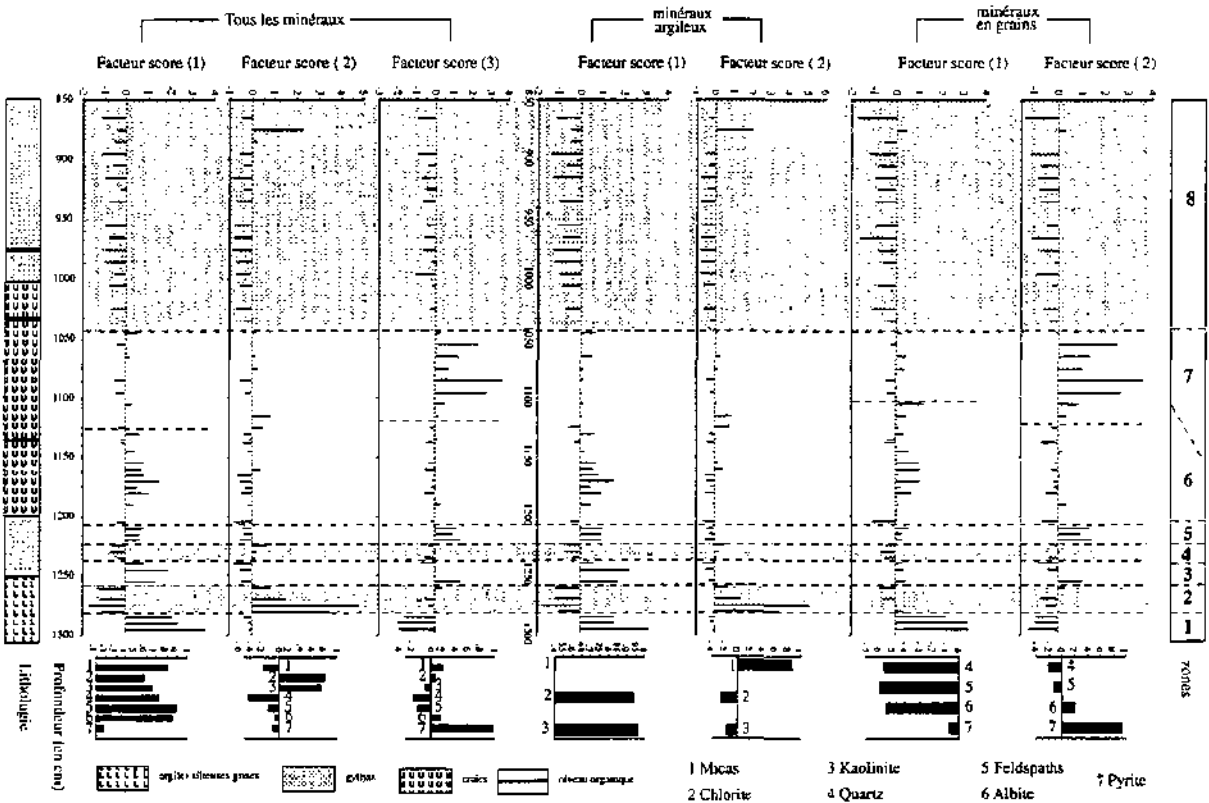


Figure 2.48 : Analyse factorielle en Composante Principales des données des intensités brutes des minéraux de la fraction 2-16 µm des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches

1.2.5.2. Les fractions granulométriques 2-16 µm

Le traitement statistique des données brutes de la fraction 2-16 µm permet d'individualiser beaucoup plus précisément des limites de contribution qui peuvent être mises en relation avec des limites de zones minéralogiques décrites plus haut. Les zones F16-3, F16-6 et F16-8 sont clairement identifiées sur la figure 2.42. Ces zones minéralogiques coïncident avec les zones 2, 4 et 6 (figure 2.47) qui présentent des contributions élevées et comparables sur plusieurs échantillons.

La figure 2.48 permet de distinguer huit zones dans le forage LLC 1-2 à 5. Ces zones peuvent également être mises en relation avec les zones minéralogiques de la figure 2.44.

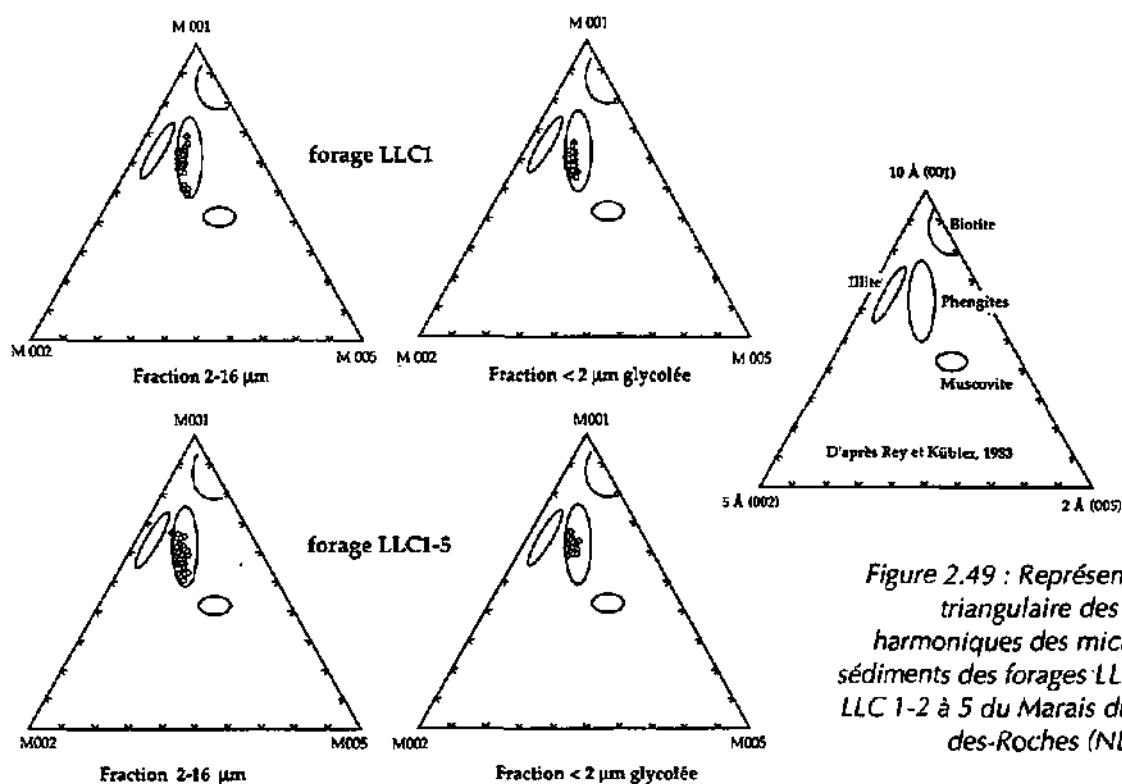


Figure 2.49 : Représentation triangulaire des séries harmoniques des micas des sédiments des forages LLC 1 et LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

Seule la limite entre les zones 6 et 7 de la figure 2.48 est difficilement repérable. Cette limite correspond à la base de la zone minéralogique F16-8. On remarque sur la figure 2.48 que ce sont les contributions des échantillons sur le facteur score 3 (tous les minéraux) et sur le facteur score 2 (des minéraux en grains), qui permettent l'individualisation la plus nette de cette zone. Les intensités brutes de la pyrite sont à l'origine de cette observation. Toutefois, on constate que le facteur score 1 (minéraux argileux) montre des contributions moins élevées avec les niveaux inférieurs (zone 6). Ces contributions sont opposées à celle de la zone 8. Dans ce cas, on est en droit de penser que la variation du contenu minéralogique observé dans la zone F16-8 correspond à une réalité géologique puisqu'elle est également identifiée mathématiquement.

1.2.6. La représentation triangulaire des séries harmoniques

Ce type de représentation est un moyen d'apprécier la composition chimique des minéraux argileux à partir des intensités brutes des séries harmoniques (cf : première partie, chapitre 2 : "Méthodes et Techniques", § 3.3.2.6).

1.2.6.1. la série harmonique des micas

La figure 2.49 illustre les résultats de la représentation des pics des micas pour les deux types de fractions (< 2 µm glycolée et 2-16 µm). Les côtés des triangles sont gradués tous les 10 %. En effet, la mesure des réflexes 001, 002 et 005 permet de déterminer plus précisément la nature des micas (Rey, Kübler, 1983).

- La fraction granulométrique décarbonatée < 2 µm glycolée présente une seule plage non dispersée dans le forage LLC 1 et les forages jumeaux LLC 1-3/4 et 5. Par comparaison

avec les travaux de Rey, Kübler (1983), la plage couverte par les points des forages du Locle correspond au domaine des phengites, micas dioctaédriques.

- La fraction granulométrique décarbonatée comprise entre 2 et 16 μm , présente deux nuages de points peu éloignés dans le cas du forage LLC 1, un seul nuage dans le cas des forages jumeaux LLC 1-3/4 et 5. Les plages de points sont peu dispersées ; elles correspondent au domaine des phengites.

La comparaison de la position des plages des micas montre que le matériel analysé est le même dans les deux fractions granulométriques ($< 2 \mu\text{m}$ glycolée et 2 et 16 μm) de ces forages. Les sédiments lacustres du Col-des-Roches contiennent dans les différentes unités lithostratigraphiques des micas détritiques qui sont des phengites. Cette origine est

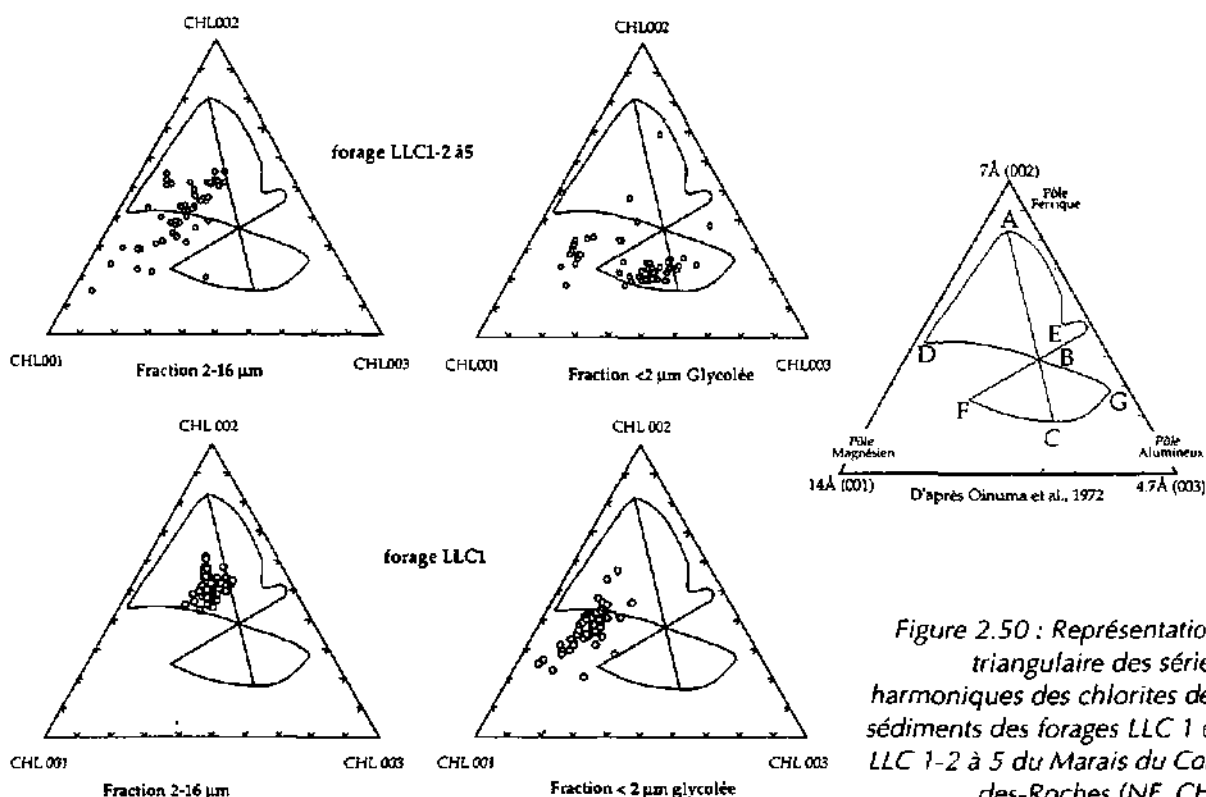


Figure 2.50 : Représentation triangulaire des séries harmoniques des chlorites des sédiments des forages LLC 1 et LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

corroborée par les travaux de Pochon, (1976, 1978) qui a montré que les micas contenus dans les sols du Haut-Jura sont hérités de la roche mère. Les micas contenus dans les sédiments lacustres sont hérités de la roche mère et des sols.

1.2.6.2. la série harmonique des chlorites

La figure 2.50 illustre les résultats de la représentation des pics des chlorites pour les deux types de fractions ($< 2 \mu\text{m}$ glycolée et 2-16 μm). Une graduation des côtés des triangles correspond à 10 %.

- La fraction 2-16 μm donne une plage relativement peu étendue pour le forage LLC 1. A l'inverse, une aire avec une importante dispersion des points caractérise les mesures des forages jumeaux ; la dispersion est peut être due à l'hétérogénéité du matériel.

- La fraction < 2 µm glycolée du forage LLC 1 montre, quant à elle, une plage unique mais très allongée selon le rapport Chl 001/Chl 002. Pour les forages LLC 1-3/4 et 5 on observe une dispersion importante des valeurs mesurées suggérant, en partie, la présence d'un matériel différent.

Par comparaison avec les travaux de Oinuma *et al.*, (1972), on remarque que la composition chimique des chlorites varie selon la fraction granulométrique considérée. Mais, la composition chimique des chlorites est comparable d'un forage à l'autre. La dispersion des points laisse penser que la composition chimique des chlorites varie d'un niveau à l'autre.

1.3. LES ANALYSES MINÉRALES DES FRACTIONS ARGILEUSES DES SÉDIMENTS OEHNINGIENS DU BASSIN VERSANT

Dans le but de préciser la nature minéralogique des formations du substrat dans cette partie du bassin, un forage à la tarière, situé vers le lieu-dit "la Molière" a été exécuté (cf. figure 1.20). Sept échantillons prélevés au hasard sur cette colonne sédimentaire ont été

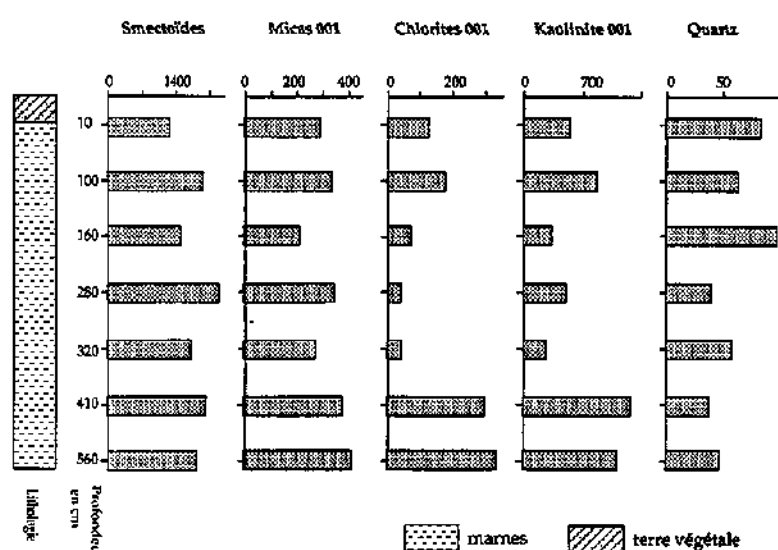


Figure 2.51 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction minérale argileuse inférieure à 2 µm glycolée des marnes de l'Oeningien Moyen du Locle (NE, CH)

analysés. Les fractions granulométriques ont été séparées et analysées de la même manière que pour les forages dans les sédiments quaternaires ; l'assemblage minéralogique est le suivant :

- pour les phyllosilicates : micas, chlorites, kaolinite, smectites ;
- pour les minéraux en grains : quartz et feldspaths potassiques.

profondeur en cm	% smectite dans les smectites	% illite dans les smectites	smectites 002 (CPS)	smectites 003 (CPS)
100	85	15	93	77
160	91	9	162	97
280	86	14	163	127
320	86	14	111	62
410	87	13	169	168
560	86	14	122	133

Tableau 2.1 : Appréciation des pourcentages d'illite et de smectite dans les smectites des marnes de l'Oehningiens Moyen du Locle

1.3.1. La fraction < 2 µm glycolée

Ce sont les intensités brutes (annexe n° 31) des smectoïdes (figure 2.51) qui fournissent les valeurs les plus élevées (elles dépassent 2000 CPS). Seul l'échantillon n°10 n'atteint pas 1500 CPS. Les intensités brutes varient peu le long du profil. Le calcul des pourcentages de smectite (couches gonflantes) dans ces smectoïdes atteint 85 % (tableau 2.1).

Les intensités brutes des micas sont très inférieures à celles des smectoïdes ; elles oscillent entre 200 et 400 CPS avec un minimum à 160 cm. Leur amplitude de variation n'est pas importante.

Les intensités brutes de la chlorite sont encore plus faibles que celles des micas. Elles diminuent entre 160 et 320 cm pour atteindre des valeurs inférieures à 100 CPS. Dans la partie profonde du forage, elles dépassent les 300 CPS.

Les intensités de la kaolinite montrent, dans ce forage, une répartition comparable à celle des micas et de la chlorite avec des intensités brutes nettement plus élevées ; elles sont supérieures à 1000 CPS à la base du forage.

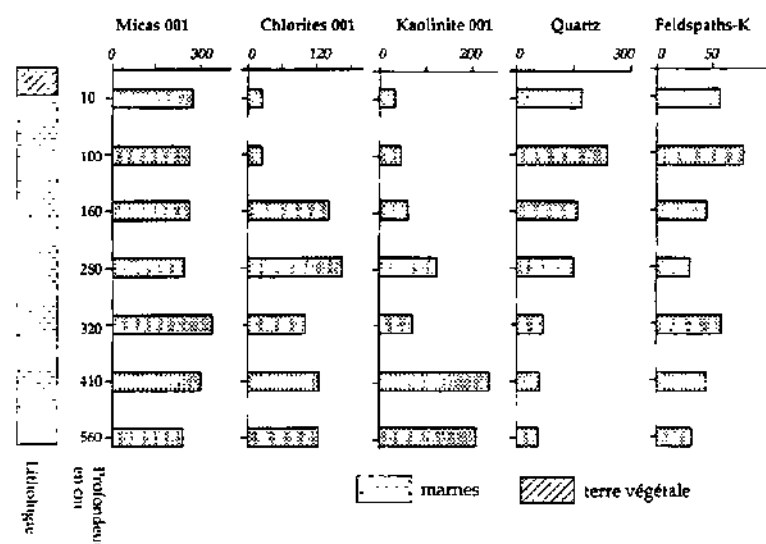


Figure 2.52 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction granulométrique 2-16 µm des marnes de l'Oeningien Moyen du Locle (NE, CH)

La distribution du quartz est opposée à la répartition des argiles. En effet, les valeurs des enregistrements sont maximum entre 10 et 160 cm. Ce minéral semble le moins bien représenté.

1.3.2. La fraction 2-16 µm

Les minéraux composant cette fraction granulométrique (figure 2.52) diffèrent de la fraction précédente par la présence des feldspaths potassiques.

Comme dans la fraction < 2 µm, les intensités brutes (annexe n° 32) des micas sont comparables, elles varient peu le long du profil.

Les intensités brutes de la chlorite ne sont pas plus importantes dans cette fraction. Elle est peu abondante entre 10 et 100 cm, elle l'est nettement plus en profondeur.

Histoire

Les intensités brutes de la kaolinite sont plus élevées entre 410 et 560 cm. Mais les valeurs des intensités de ce phyllosilicate sont plus faibles dans cette fraction que dans la fraction $< 2 \mu\text{m}$.

La distribution du quartz n'apporte pas d'éléments nouveaux dans la fraction 2-16 μm bien que les valeurs soient beaucoup plus fortes.

Malgré les faibles intensités, la répartition des feldspaths potassiques permet d'identifier deux ensembles. Le premier est constitué par les échantillons 10, 100, 160 où des

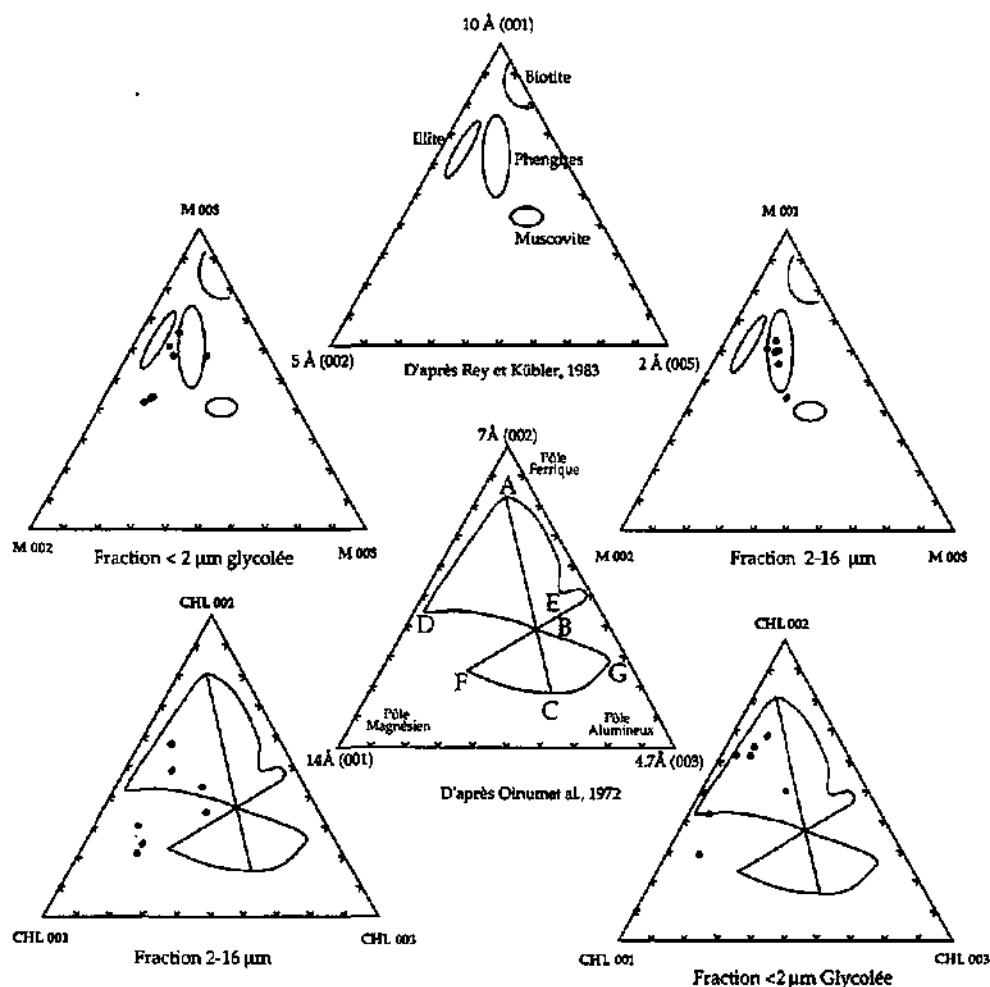


Figure 2.53 : Représentation triangulaire des séries harmoniques des micas et des chlorites des niveaux oehningiens du Locle (NE, CH)

valeurs supérieures à 50 CPS peuvent être notées, ces intensités baissent nettement en dessous de 50 CPS entre 160 et 280 cm. Dans le second ensemble, entre 280 et 560 cm, les intensités brutes sont en régression constantes.

1.3.3. Les séries harmoniques des sédiments oehningiens

Les intensités brutes qui ont été relevées pour les harmoniques des micas de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ montrent que les micas sont entre les illites et les phengites (figure 2.53). Par contre les micas de la fraction 2-16 μm sont plutôt des phengites.

Les intensités brutes des chlorites donnent, pour les deux fractions granulométriques de ces marnes, un nuage de points très dispersé, globalement centré sur le domaine ADE.

L'analyse des fractions granulométriques de ces marnes montre que le matériel diffère sensiblement d'une fraction à l'autre.

1.4. COMPARAISON DES ZONES MINÉRALOGIQUES DES FRACTIONS ARGILEUSES DES SÉDIMENTS LACUSTRES ET OENINGIENS

Nous avons vu précédemment, qu'il est très difficile d'établir une correspondance entre les zones minéralogiques de la base des forages LLC 1-2 à 5 et celles du sommet du forage LLC1 bien qu'une partie commune de trois mètres (craies lacustres et début des argiles silteuses grises) ait été analysée. Ce problème résulte de l'absence de deux minéraux (paragonite dans la fraction 2-16 µm et l'amphibole dans les fractions inférieures à 2 µm et 2-16 µm) dans les forages LLC1-2 à 5. Mathématiquement cette synchronisation des forages est difficile à établir de manière sûre. Toutefois, les zones minéralogiques des deux fractions sont cohérentes pour un même forage (figure 2.54). La plupart du temps, les intensités

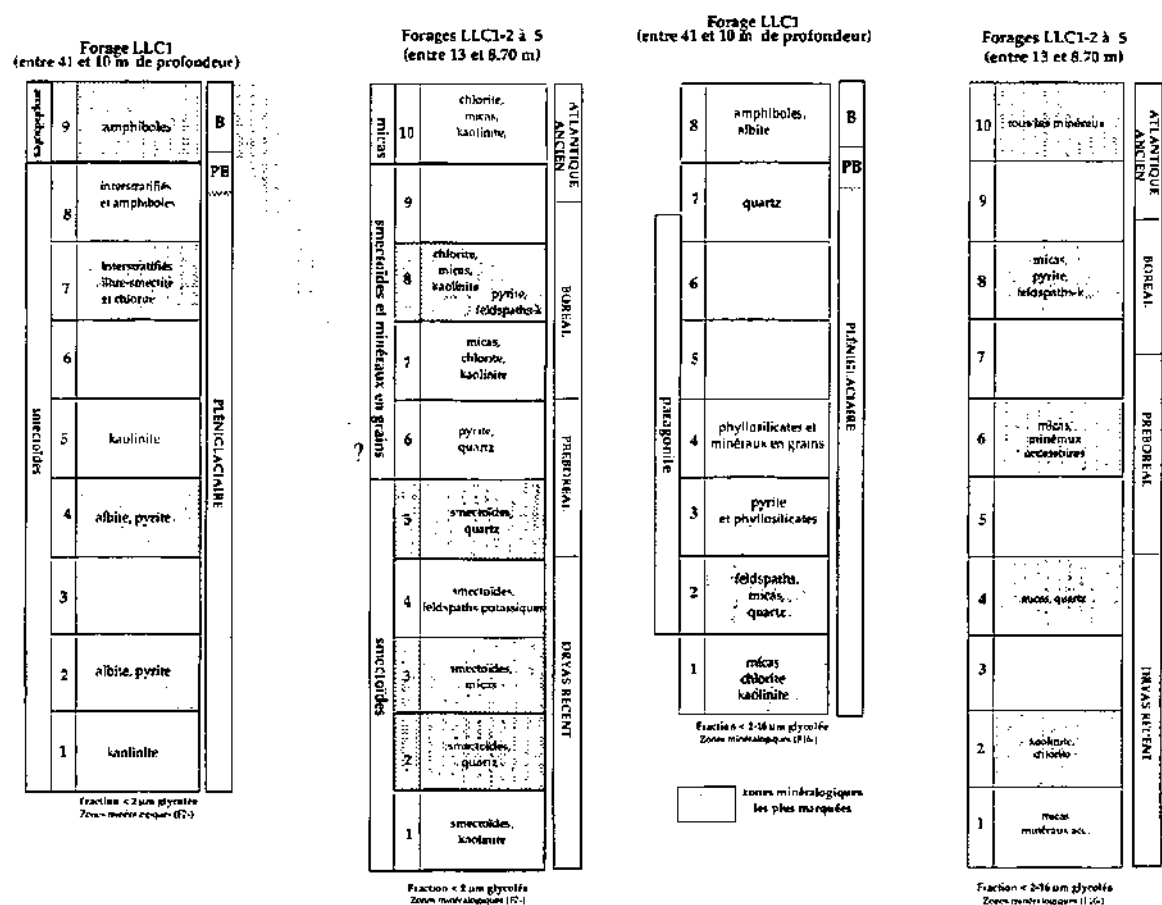


Figure 2.54 : Synthèse des analyses sur les fractions argileuses des forages du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) avec les phases les plus caractéristiques

brutes des minéraux de la fraction 2-16 µm sont supérieures à celles de la fraction < à 2 µm. Les interstratifiés (smectoides) sont constitués entre 70 et 85 % par de la smectite et à 25 à 30 % par de l'illite (tableaux 2.2 et 2.3). Ces smectoides de type smectite-illite sont absents

Profondeur en cm	% de smectite dans les smectoides	% d'illite dans les smectoides	smectoides 002 (CPS)	smectoides 003 (CPS)
2103	82	18	47	24
2250	78	22	92	65
2278	72	28	40	25
2522	79	21	47	35
2553	78	22	58	44
2833	83	17	29	16
2855	80	20	24	22
3028	77	23	38	27
3058	82	18	52	35
3075	80	20	54	48
3104	79	21	47	37
3121	75	25	45	37
3194	73	27	33	30
3223	80	20	35	19
3849	79	21	56	40
3901	76	24	37	34
4037	76	24	27	21

Tableau 2.2 : Appréciation du pourcentage d'illite dans les smectoides du forage LLC 1

Tableau 2.3 : Appréciation du pourcentage d'illite dans les smectoides du forage LLC 1-5 du Locle

profondeur en cm	% smectite dans les smectoides	% illite dans les smectoides	smectoides 002 (CPS)	smectoides 003 (CPS)
1255	80	20	39	28
1265	77	23	58	35
1270	85	15	80	60
1275	79	21	72	53
1280	84	16	38	30
1285	83	17	93	72
1290	76	24	78	41
1295	82	18	60	31

de la fraction 2-16, ils sont remplacés par la paragonite dans le forage LLC 1 uniquement. Toutefois, les diagrammes triangulaires comme le calcul des pourcentages d'interstratifiés révèlent que le matériel analysé (sur près de 32 m dans LLC 1) est de nature minéralogique comparable à celui des forages LLC1-2 à 5.

Les marnes de l'Oeningien Moyen qui constituent, par endroits, la base des sédiments lacustres, ont une composition minéralogique peu différente de celle des sédiments lacustres. Les micas et les chlorites sont de nature et de composition chimique identiques. De plus les smectoides, contenant plus de 85 % de couches gonflantes et 25 % d'illite environ, sont identifiées dans les sédiments lacustres et les marnes du bassin versant.

En dépit des difficultés décrites plus haut, trois objectifs importants ont été atteint par l'étude des fractions granulométriques < à 2 µm et 2-16 µm. Nous avons observé une évolution du contenu minéralogique des fractions dans les différentes unités sédimentaires qui composent le sédiment lacustre du Col-des-Roches.

- Il a été possible de montrer que la composition minérale des fractions argileuses varie pour des sédiments qui présentaient, en apparence, une composition minérale (sédiment total) homogène : zones RT 1e (LLC1), RT 2 (LLC1), et zones RT 3 et RT 4 (LLC1-2 à 5) pour les périodes allant du Pléniglaciaire à l'Holocène.

- Le second résultat concerne la mise en évidence de l'amphibole dans les fractions < à 2 et 2-16 μm du forage LLC 1 alors que ce minéral n'était pas identifié dans le sédiment total (craies lacustres) en raison de l'abondance de la calcite. Par ailleurs nous avons vu, d'après les fractions, que le taux de pyrite est plus important qu'il ne le paraissait dans le sédiment total.

- Le troisième résultat concerne les zones F2-8 et F16-8. La recrudescence de la pyrite, du quartz, des feldspaths et des argiles est indubitablement la manifestation d'une récurrence détritique qui se développe dans la craie lacustre au milieu du Boréal.

1.5. INTERPRÉTATION - DISCUSSION

1.5.1. Les apports de l'analyse minéralogique des sédiments du Locle

Les minéraux que nous avons identifié dans les poudres de la "roche totale" de même que ceux qui le sont à travers les fractions granulométriques (< à 2 μm et 2- 16 μm) sont pour les forages du marais du Col-des-Roches :

- la calcite, la dolomite, l'aragonite, le quartz, les feldspaths potassiques, les plagioclases, la pyrite et les phyllosilicates.

Parmi les phyllosilicates sont principalement identifiés :

- des smectoïdes, du mica, de la chlorite, la kaolinite et de la paragonite.

Les minéraux accessoires déterminés dans les résidus insolubles < à 2 μm et 2 et 16 μm sont peu différents de ceux de la "roche totale" :

- le quartz, les plagioclases, les feldspaths potassiques, l'amphibole et la pyrite.

D'une manière générale, la dolomite entre dans la composition des sédiments de la base des trois forages (LLC 1, LLC 1-3/4/5 et LLC 2) avec une certaine quantité d'aragonite et de calcite. La présence de ces minéraux coïncide avec le faciès des argiles silteuses grises du Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire avec ou sans niveaux sableux intercalés. Les smectoïdes et la paragonite sont principalement rencontrés dans cette unité lithostratigraphique. Les autres minéraux argileux (les micas, les chlorites et la kaolinite) sont ubiquistes, mais présentent leurs intensités brutes les plus élevées dans les argiles silteuses grises.

Les phyllosilicates sont surtout représentés dans les argiles silteuses basales, les gyttjas et les tourbes. La calcite est le minéral principal des craies lacustres du Préboréal et du Boréal. Dans ce faciès on trouve des amphiboles et de l'albite. L'identification des smectoïdes et de la paragonite, y est rare ; la dolomite est absente.

Les fractions granulométriques des tourbes du forage LLC2 apparaissant riches en phyllosilicates et en quartz n'ont pas été étudiées dans le détail. Cependant, les gyttjas qui montrent de fortes intensités brutes pour les phyllosilicates dans le sédiment total n'ont pas révélé des intensités brutes importantes lors de l'analyse des fractions argileuses.

1.5.2. Analyse numérique des données

L'Analyse Factorielle en Composantes Principales des pourcentages des minéraux (de

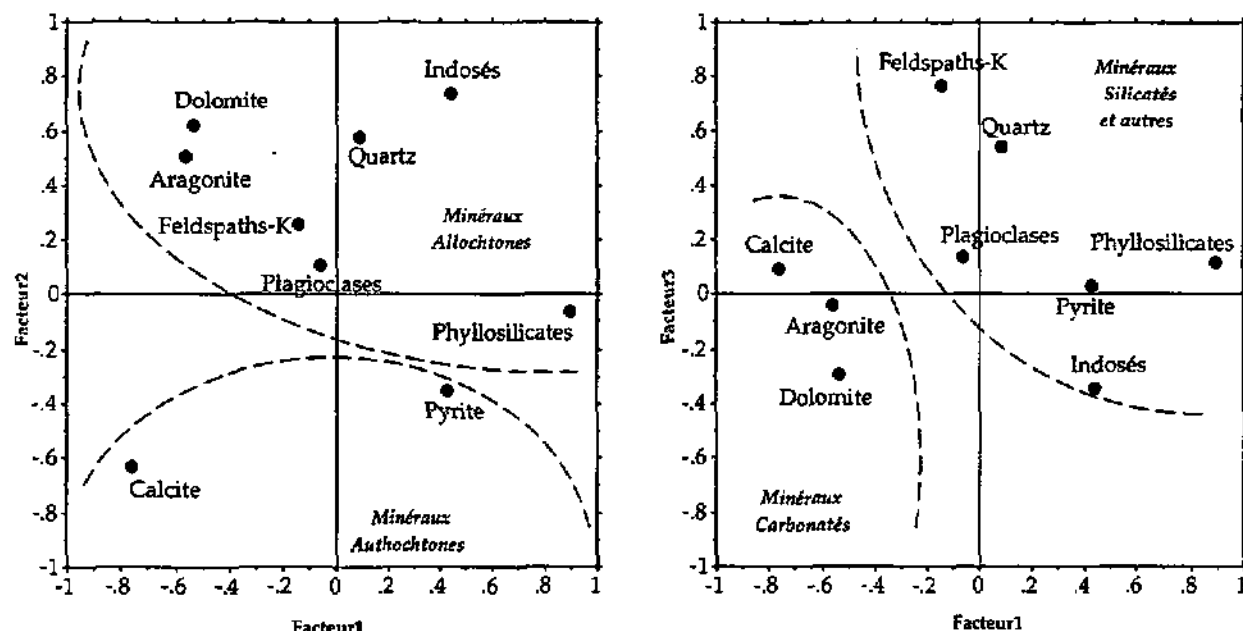


Figure 2.55 : Analyse factorielle en Composantes Principales des données de la minéralogie (pourcentages) des sédiments du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)

tous les échantillons), permet à travers les deux premiers plans factoriels la distinction d'un groupe formé par les minéraux allochtones (figure 2.55) : dolomite, quartz, aragonite, plagioclases, phyllosilicates, feldspaths potassiques et d'un second groupe formé par les minéraux autochtones : calcite et pyrite.

Ce traitement statistique permet également de faire la distinction (figure 2.55) de deux grandes familles de minéraux. Il s'agit de la famille des minéraux silicatés et non silicatés. La seconde famille se distingue de la première par la nature de ces éléments, ces derniers sont en effet des minéraux exclusivement carbonatés : calcite, aragonite et dolomite.

1.5.3. Les associations minéralogiques

La composition des diverses associations minéralogiques dépend de l'évolution du rapport entre les minéraux endogènes et terrigènes. Ce rapport est fortement influencé par les saisons, la localisation géographique et la profondeur de l'interface sédimentaire (Bapst, 1987 ; Schwalb, 1992). Les associations minéralogiques qui sont définies ici dépendent essentiellement de l'origine des apports.

1.5.3.1. L'association minéralogique 1, le faciès des argiles silteuses grises

Cette association, correspondant à la zone minéralogique RT1 des forages LLC 1, LLC 1-2 à 5 et LLC 2, regroupe les minéraux suivant : calcite, dolomite, quartz, aragonite, smectoïdes. Les micas, la chlorite et la kaolinite constituent une part infime des

phyllosilicates. Les principaux minéraux en grains des fractions argileuses qui peuvent être rencontrés sont principalement le quartz, les feldspaths et la pyrite. Tous ces minéraux sont identifiés dans les argiles silteuses grises du Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire.

1.5.3.2. *L'association minéralogique 2, le faciès des craies lacustres*

L'association minéralogique 2 (RT2 ; de - 12,30 m à - 10 m LLC 1 et LLC1-2 à 5) comporte exclusivement de la calcite et de l'aragonite. La dolomite est absente. Les minéraux argileux ne comprennent pas (ou peu) de smectoïdes, de micas, de chlorite et de kaolinite ; ces minéraux n'ont, d'après les intensités brutes, qu'un rôle accessoire.

1.5.3.3. *L'association minéralogique 3, le faciès des gyttjas et des tourbes*

L'association minéralogique 3 se distingue par l'absence de calcite mais par la présence de phyllosilicates et de quartz. Ces minéraux sont rencontrés majoritairement dans les tourbes. Les gyttjas contiennent une certaine quantité de calcite, dont les proportions sont variables mais systématiquement en quantité inférieure à celle des craies, en mélange avec les phyllosilicates et le quartz. Dans le forage LLC 2, les tourbes sont très bien représentées et permettent de suivre la distribution de ces minéraux. Nous avons remarqué que la quantité de phyllosilicates n'est, en réalité, pas aussi importante qu'elle ne le paraissait par la diffraction du sédiment total. Toutes les intensités brutes des micas, des chlorites et de la kaolinite sont peu élevées.

Il faut toutefois reconnaître, comme Bapst (1987), que cette classification est très rigide malgré l'excellent cadre général qu'elle constitue. Souvent l'attribution de certains minéraux à une association plutôt qu'à une autre reste difficile car des minéraux peuvent avoir une origine multiple comme par exemple la calcite, le quartz.

1.5.4. Les faciès sédimentaires

Les analyses minéralogiques qui ont été effectuées sur les sédiments du Marais du Col-des-Roches conduisent à la reconnaissance de trois associations minéralogiques qui peuvent être mises en regard des données sédimentaires. Ces faciès sédimentaires sont au nombre de trois : les argiles silteuses grises et les sables glacio-lacustres, les craies lacustres et les limons organiques. Nous pouvons, après analyse, subdiviser ces faciès à partir des proportions des minéraux rencontrés.

1.5.4.1. *Les argiles silteuses grises*

Fortes de la présence de 2.5 à 5 % de dolomite, 50 % de calcite et 2.5 à 4 % d'aragonite, ces argiles ont une composante minérale relativement homogène et stable d'un forage à l'autre (figure 2.56). Les valeurs qui sont citées ici sont des moyennes calculées sur certaines portions des forages. Les niveaux sableux qui alternent avec les niveaux argileux ne montrent pas une composition minéralogique différente, les minéraux sont les mêmes dans les différentes fractions granulométriques. Nous avons vu plus haut, qu'un même minéral se rencontre aussi bien dans le sédiment total que dans les fractions minérales fines (< à 2 µm et 2-16 µm).

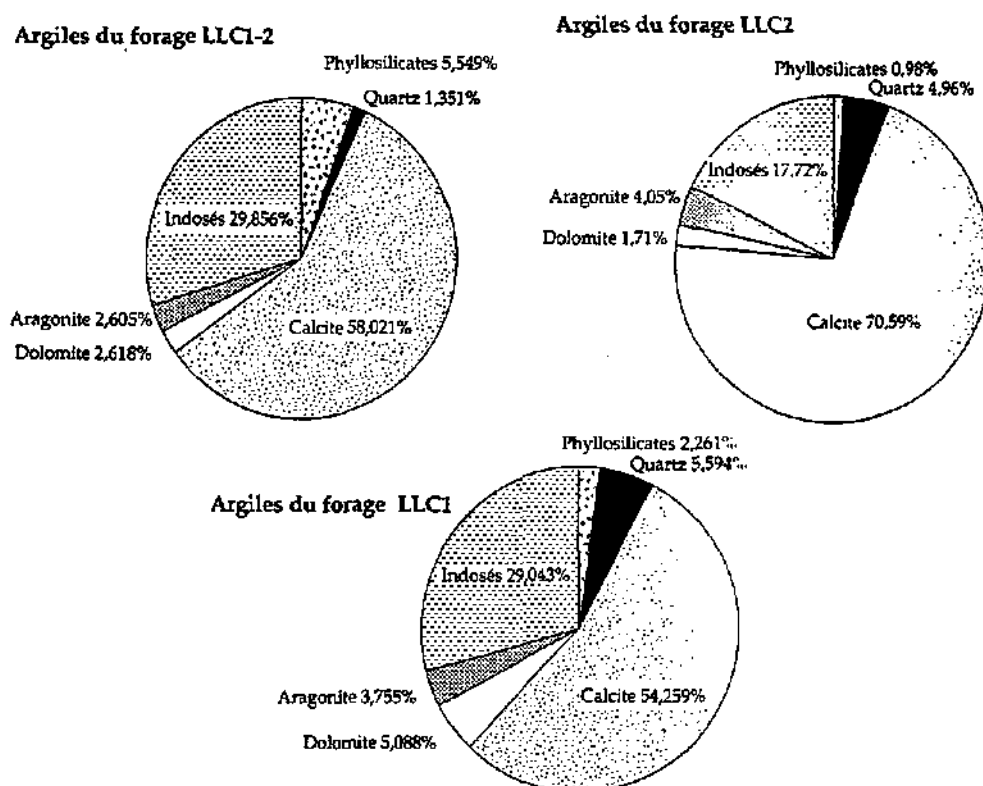


Figure 2.56 : Pourcentages moyens des différents minéraux (association minéralogique 1) constituant les faciès des argiles silteuses grises.

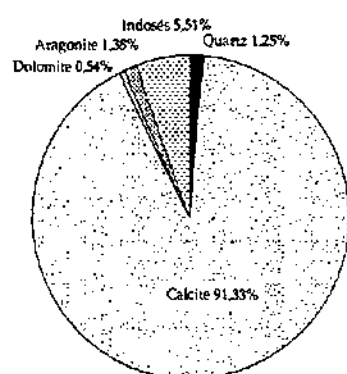
L'origine détritique des minéraux composant ce matériel sera discutée plus loin. Celle-ci sera attestée par les analyses des formations du bassin versant et par des données de la littérature (Favre, 1911 ; Favre *et al.*, 1937 ; Kübler, 1962 a, b).

1.5.4.2. Les craies lacustres

Nées des phénomènes biochimiques et/ou des précipitations physico-chimiques (Hakanson et Jansson, 1983 ; Kelts et Hsü, 1978 ; Portner, 1951 ; Magny, 1991 a, b ; Schwalb, 1992), les craies lacustres renferment nettement plus de 85 % de calcite et de 0 à 1 % de pyrite. Ces taux peuvent être beaucoup plus élevés, par exemple les craies du lac de Zürich contiennent plus de 95 % de carbonates, avec une composante détritique infime (Kelts et Hsü, 1978). Au début de ce siècle déjà, Joukowsky et Buffle (1938) décrivent la composition des craies du Léman ; elles renferment de la calcite en quantité nettement supérieure à celle contenue dans les sédiments glacio-lacustres. Parallèlement, ces auteurs remarquent l'apparition progressive de la pyrite (environ 2 %) conjointement à l'augmentation de calcite. Moscariello (1996) décrit dans ce lac, à partir des données provenant du même diffractomètre, des craies qui contiennent environ 70 % de CaCO_3 et 7 % de pyrite. Les craies du lac de Neuchâtel, contiennent de la dolomite mais pas de pyrite (Kübler, 1988 ; Schwalb, 1992).

Les craies lacustres du paléolac du Locle (figure 2.57) contiennent, d'après la diffraction, environ 2 à 3 % de pyrite dans les fractions argileuses entre -10.30 et 12.00 m de profondeur. La sur-représentation de la calcite masque probablement ce minéral (Klug,

Craies lacustres du sondage LLC1



Craies lacustres du sondage LLC1-2

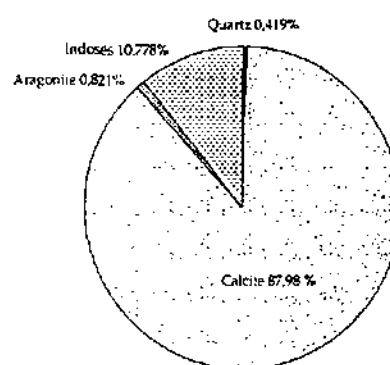


Figure 2.57 : Pourcentages moyens des différents minéraux (associations minéralogiques 2 et 3) constituant les facies des craies des tourbes.

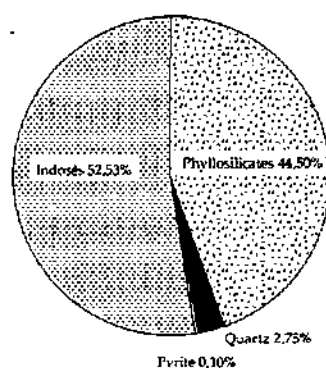
Alexander, 1974 ; Starkey *et al.*, 1984) lors des analyses des poudres. L'origine de cette pyrite est probablement endogène comme le pensaient également Joukowsky et Buffle en 1938. Cette origine endogène est en partie corroborée par l'analyse statistique des données (figure 2.55). Les craies du Locle ne comportent pas de dolomite comme celles du Lac de Neuchâtel et le Léman.

L'assemblage minéralogique présenté ici souligne l'épisode de sédimentation authigénique, c'est à dire de précipitation biochimique et chimique des carbonates qui forment les craies de ce lac. Portner, 1951, Kübler, 1962 a, b, 1988 ; Serruya, 1969 ; Bapst, 1987 ; Schwalb, 1992 ; Zeroual, 1995 ; Moscariello, 1996 ; Filippi, 1996 entre autres car d'autres travaux sont en cours, signalent des épisodes comparables du point de vue minéralogique dans le lac de Neuchâtel, le Loclat, le Léman, le lac Isl.

1.5.4.3. Les tourbes

A l'opposé des craies, les tourbes se traduisent aux rayons X, par la quasi absence de minéraux excepté les phyllosilicates et le quartz (figure 2.58). L'origine du quartz dans les

Tourbes du sondage LLC1



Tourbes du sondage LLC2

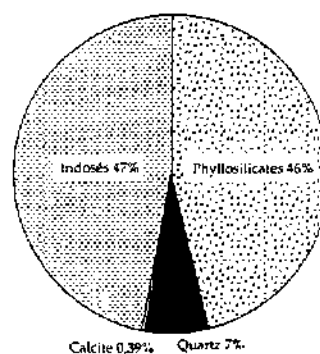


Figure 2.58 : Pourcentages moyens des différents minéraux (associations minéralogiques 2 et 3) constituant les facies des craies des tourbes.

tourbes peut être soit détritique (lessivage, apports éoliens) soit endogène (squelette des diatomées, ou feuilles des laïches). Les diatomées comme les laïches sont abondamment rencontrées dans les tourbières (Finney *et al.*, 1968).

Dans le forage LLC1, les tourbes alternent avec des gyttjas de façon non homogène ; les tourbes se reconnaissent toujours à leur taux de phyllosilicates et à l'absence totale de calcite (en roche totale). Par contre il est possible de rencontrer de l'aragonite. Les alternances de tourbe et de gyttja traduisent les étapes successives de passage du milieu lacustre au milieu palustre. Cette phase de sénilité (Magny, 1991 a, b, 1992 b) s'est achevée artificiellement au début de ce siècle (Jaccard, 1892).

1.5.4.4. Les gyttjas

En marge de ces deux faciès (tourbes et craies lacustres), les gyttjas (figure 2.59) peuvent être définies minéralogiquement comme un continuum entre les tourbes et les craies. Une gyttja est un faciès de comblement ou d'émersion (Magny, 1991 a, b, 1995 a, b, c, d). Ce faciès a une composante minéralogique dominée par la calcite. Le pourcentage des minéraux indosés y est nettement moins élevé que dans les tourbes. A priori, il est très difficile de distinguer une gyttja crayeuse d'une craie lacustre sur la seule vue des diffractogrammes ; une gyttja crayeuse est d'après les analyses minérales une craie organique (ou craie brune). La plupart des gyttjas décrites dans ces forages sont en fait des craies brunes.

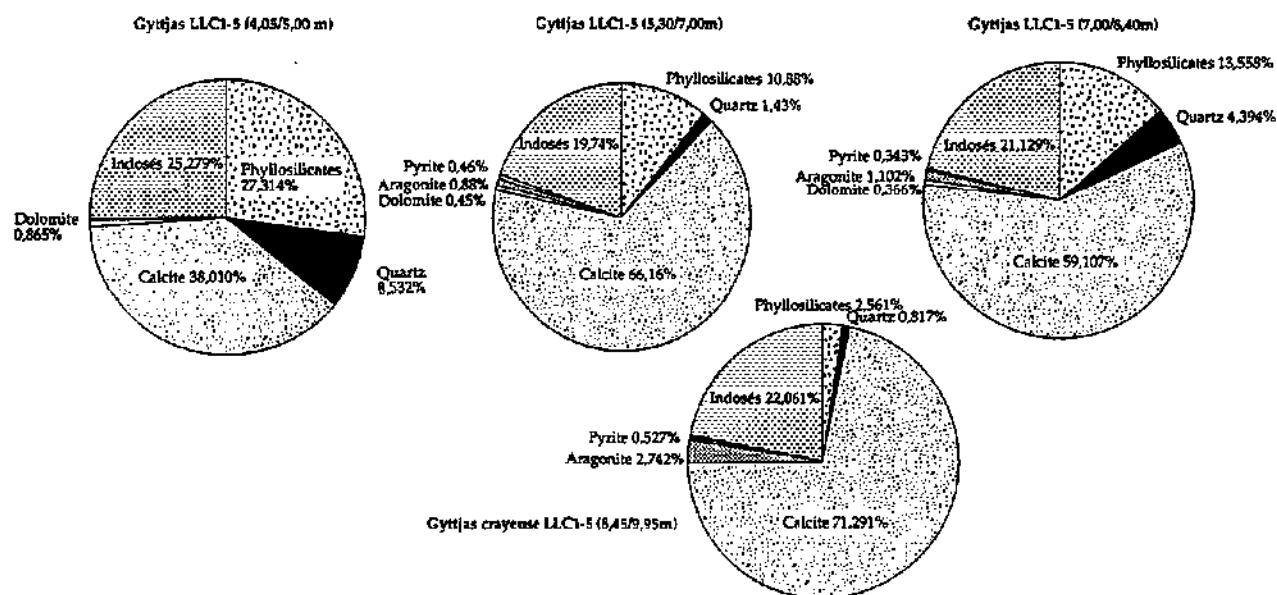


Figure 2.59 : Pourcentages moyens des différents minéraux (association minéralogique 3) constituant le faciès des gyttjas.

1.5.5. Origine sédimentaire

Dans la région, les associations minéralogiques des bassins sédimentaires sont surtout connues grâce à la multiplication des analyses effectuées au LMPG à Neuchâtel depuis les

années 70. Les premiers travaux ont surtout concerné les assises du Jurassique et du Crétacé (Persoz, Steinhäuser, 1970 ; Persoz, Remane, 1976 ; Persoz, 1982 ; Adatte, Rumley, 1984 ; Adatte, 1988). D'autres auteurs comme Pochon, 1976 et 1978 ; Turberg, 1987 ; Adatte, Rentzel, Kübler, 1991 ; Schwalb, 1992 ; Di Giovanni, 1994 ; Bichet, 1997 ont surtout travaillé sur le Quaternaire.

1.5.5.1. Les minéraux carbonatés

La calcite, la dolomite et l'aragonite contenues dans les argiles silteuses grises sont des minéraux hérités de la roche mère (au sens large) qui est représentée par les séries du Jurassique Supérieur, le Crétacé et enfin le Tertiaire. Cet héritage était déjà plus ou moins bien connu depuis les travaux de Favre (1911) et de Kübler (1962 a, b). La calcite provient, en partie, de la très grande porosité et altérabilité des craies lacustres du paléolac tertiaire (Burger, Schaer, 1996). Ces craies lacustres tertiaires contiennent plus de 95 % de calcite sous forme de concrétions carbonatées (Kübler, 1962). Une certaine quantité de calcite détritique peut également provenir des assises jurassiques et crétacées.

L'aragonite est le constituant secondaire des craies lacustres des niveaux oehringiens du Locle (Kübler, 1962 a, b). Il n'est pas rare qu'elle soit accompagnée de dolomite. La présence d'aragonite, dans les sédiments quaternaires, provient d'un héritage des charbons feuilletés (faciès organogènes) de l'Oeningien supérieur qui contiennent une abondante faune malacologique (20 à 35 % du sédiment) (Kübler, *loc. cit.* ; Favre, 1911 ; Favre *et al.*, 1937).

La dolomite contenue dans les sédiments quaternaires (du Pléniglaciaire à l'Holocène) est également un indicateur du détritisme. Cette dolomite est héritée des niveaux oeningiens inférieurs et du Portlandien (Pochon, 1978) mais les couches jurassiques en sont suffisamment riches pour alimenter la bassin loclois (Kübler, 1962). Cet auteur montre que la dolomite des faciès oeningiens est héritée du Portlandien. Le rapport dolomite/calcite pourrait permettre de fixer la limite entre la sédimentation détritique et authigénique (Kübler, 1962), mais il serait superflu de la présenter ici en raison du changement notable de sédiment à 13 m de profondeur.

La calcite contenue dans les craies lacustres quaternaires est, à l'opposée, d'origine endogène. Les résultats des analyses sédimentologiques seront discutés plus loin. Cependant, sur la base de travaux antérieurs, Magny (1991 a, b, 1992 b) est capable d'identifier dans ces craies différents types de concrétions carbonatées provenant d'activité biologique. Une autre partie de la calcite du Locle provient de l'activité phytoplanctonique. Lorsque le taux de calcite devient élevé (apparition des craies lacustres) les marqueurs du détritisme (dolomite, aragonite, quartz, smectites, phengites chlorite...) disparaissent. Il reste toutefois possible qu'une part accessoire de la sédimentation carbonatée soit d'origine détritique comme c'est le cas par exemple dans le lac de Neuchâtel actuellement (Schwalb, 1992). A l'avenir, nous pourrions effectuer un examen microscopique approfondi du sédiment pour apprécier, entre autre, l'ampleur de la re-sédimentation de calcite plus ancienne.

1.5.5.2. Le cas de la pyrite

Nous avons vu que la pyrite fait figure de minéral autochtone ; il est rencontré aussi bien dans les argiles silteuses grises que dans les craies lacustres et les niveaux gyttjas, en l'absence de toutes traces de dolomite. L'analyse en composante principale met très bien ceci en évidence (figure 2.55). Ce minéral, révèle également des conditions réductrices du milieu de dépôt en présence d'une hauteur d'eau peu agitée (Raiswell, Canfield, Berner, 1994).

Pour Joukowski et Buffle (1938), l'origine endogène de la pyrite est incontestable et doit jouer un rôle important en raison des proportions rencontrées par ces auteurs. Les cristaux observés au microscope sont souvent automorphes et de taille régulièrement supérieure à 10 µm. La particularité de ces minéraux est leur présence systématique à l'intérieur de structures d'origine biologique comme les diatomées, les grains de pollen et les tissus animaux ou végétaux. La pyrite se forme donc à l'intérieur de ces habitacles hermétiquement clos et à l'abri de l'influence du milieu extérieur. Les cristaux de calcite ne sont jamais rencontrés à l'intérieur de ces structures. Le fer et le soufre ont donc dû être concentrés par des bactéries au moment de la putréfaction de ces organismes.

Aujourd'hui, aucune étude supplémentaire spécifique à la pyrite n'est venue confirmer ou infirmer ces résultats. Les analyses présentées ici, vont dans le sens des observations de Joukowski et Buffle (1938). En effet, si ce minéral se forme dans des structures biologiques au moment de leur mort, il semble naturel de rencontrer la pyrite aussi bien dans les argiles silteuses que dans les craies et les gyttjas car ces sédiments contiennent tous de la matière organique.

1.5.5.3. Les minéraux silicatés non phylliteux

Nous avons vu plus précédemment que les principaux minéraux de la "roche totale" sont issus du substratum jurassique, du Crétacé et du Tertiaire. Le quartz, les feldspaths potassiques et les plagioclases sont présents dans toutes les fractions granulométriques de ce substratum. Vraisemblablement quelques minéraux rencontrés dans les sédiments de ce paléolac pourraient avoir une origine éolienne.

Dans ces travaux, Pochon (1978) attribue une origine éolienne à tout un cortège minéralogique identifié dans les différents horizons des sols du Haut-Jura. Spaltenstein (1984) propose également une origine éolienne à la présence de l'amphibole dans les sols du Jura. Par analogie, la présence d'amphibole dans les craies lacustres pourrait elle aussi résulter d'apports éoliens lointains ; mais cette hypothèse se heurte à plusieurs contradictions :

- Si les amphiboles avaient une origine éolienne, on devrait identifier la présence de ce minéral dans tous les forages.

- Les nombreuses moraines rissiennes, localisées à la périphérie du bassin versant (Nussbaum, Gygax, 1935), auraient pu, par érosion, alimenter les sédiments lacustres en amphiboles. Mais, si tel était le cas on aurait dû également en retrouver et de manière plus systématique dans les craies des forages LLC1-2 à 5, réalisés à 1 m (environ) du forage LLC1.

- Une pollution des sédiments lors du prélèvement ne peut être retenue car nous aurions dû identifier les amphiboles tout au long du forage LLC1, or ce n'est pas le cas.

Force est de constater que nous ne disposons pas actuellement d'arguments pour expliquer la présence des amphiboles dans les sédiments carbonatés autochtones du Locle.

1.5.5.4. Les phyllosilicates

En résumé, les données anciennes indiquent que les assises du Jurassique et du Crétacé sont surtout caractérisées par un assemblage minéralogique des fractions argileuses dans lequel sont représentées les interstratifiés, les micas, la kaolinite et la chlorite. Le Portlandien renferme beaucoup plus de micas et de smectoides que de kaolinite et chlorite. Le quartz et les feldspaths potassiques y sont les minéraux accessoires (Adate *et al.*, 1991). La kaolinite, la chlorite, les micas (biotite et muscovite) sont pour ainsi dire les seuls constituants des fractions argileuses des assises de la région locloise (Kübler, 1962 ; Pochon, 1978).

Les données nouvelles présentées ici permettent en outre de montrer que tous les éléments constitutifs du faciès argilo-silteux dérivent du bassin versant. L'analyse des plaques orientées de l'Oeningien Moyen montre que cette formation, qui constitue par endroits la base des sédiments lacustres, est une source non négligeable de couches gonflantes (smectites), de micas et de kaolinite pour les sédiments lacustres.

Les smectoides

Les smectites sont très abondantes dans les formations géologiques allant du Jurassique au Quaternaire (Pochon, 1978 ; Persoz, 1982, Adate, Rumley, 1984 ; Bapst, 1987 ; Bichet, 1997) dans le Jura et le Plateau Suisse. Les minéraux interstratifiés marquent le début de l'altération des minéraux argileux détritiques. Ce minéral semble absent des suspensions du lac de Neuchâtel. Cette absence a été expliquée soit par la faible quantité des apports terrigènes et leur dilution dans les carbonates et la matière organique soit par la méthode d'isolement des suspensions (la filtration n'aurait pas permis la retenue des smectites) (Bapst, 1987 ; Schwalb, 1992).

L'érosion des niveaux oeningiens due aux précipitations > à 1100 mm/an (cf : figure 1.5 et 1.14) et aux glissements (Burger, Schaer, 1996) est, dans cet environnement calcaire, favorable (Pochon, 1978). Le calcaire actif est peu agressif pour les minéraux argileux en particulier, le moment entre la libération et la re-sédimentation est trop court pour que des phénomènes d'altération de ces argiles aient provoqué des modifications sensibles (Pochon, *loc. cit.*). Le taux de gonflants des smectoides contenus dans les marnes et le faciès argileux que nous avons calculé est identique. Ce taux est comparable à celui que Pochon (1978) trouvait dans les sols sur calcaire oehningien. Dans ces sols, la kaolinite et la chlorite forment le reste du groupe des phyllosilicates. Le quartz, les feldspaths potassiques et les plagioclases proviendraient, d'après cet auteur, d'un remaniement. Une partie des smectoides contenue dans les sédiments lacustres peut provenir des sols.

Les autres minéraux argileux

La Molasse du Plateau Suisse contient de la chlorite, des micas mais pas de kaolinite. Les plagioclases s'y trouvent en quantités non négligeables (Adate et al., 1991). La paragonite, la chlorite, les micas, les amphiboles et les plagioclases caractérisent le matériel morainique d'origine alpine (Adate et al., 1991). C'est ainsi que la chlorite ferrifère, la kaolinite et le mica d'une part et le quartz, plagioclases et feldspaths potassiques d'autre part constitueraient la composante éolienne.

La chlorite, l'illite et les smectites sont des constituants des fractions argileuses allant de l'Helvétien (chlorite uniquement) au Tertiaire. Les illites ne sont pas d'origine alpine. La chlorite est absente des niveaux du Malm et du Dogger, l'origine alpine de ce minéral est proposée par Vernet, 1958 ; Kübler, 1962 a, b; Schwalb, 1992. La kaolinite est jurassienne si elle provient des marnes rouges issues du remaniement du sidérolitique proprement dit. Malgré sa présence fréquente dans les suspensions des rivières jurassiennes (Bapst, 1987 ; Bichet, 1997), la kaolinite n'est rencontrée que sporadiquement dans les sédiments du lac de Neuchâtel par exemple.

Au Locle nous avons de la paragonite, de la chlorite et de la kaolinite. Nous avons clairement identifié une source de kaolinite et de chlorite sur ce site ; il s'agit des faciès marneux de l'Oeningien Moyen. La composition chimique des chlorites de ces niveaux est identique à celles des fractions qui ont été isolées des sédiments lacustres quaternaires. De plus, nous avons montré que les micas de ces deux types de sédiments étaient de même nature : des phengites. Précédemment nous avons également montré que les smectoides des sédiments du paléolac étaient directement hérités des marnes et des sols. Il est donc concevable d'attribuer uniquement l'origine des chlorites et de la kaolinite aux marnes tertiaires.

1.5.5.5. Le cas des pollens

L'analyse du contenu sporopollinique de quelques niveaux marneux a révélé la présence d'éléments de la flore tertiaire bien conservés. Ces pollens font figure d'excellents traceurs sédimentaires, indiquant l'origine des niveaux dont ils sont issus. En effet, les sédiments lacustres du lac des Brenets renferment des représentants de cette flore tertiaire (Campy et al., 1985 ; Di Giovanni, 1994 ; Campy et al., 1994). Une part importante de la flore pléistocène est dérivée de cette flore. Le tilleul, le chêne, le charme, le hêtre, le sapin, le pin existaient déjà. Les espèces étaient différentes de celles connues actuellement (Traverse et al., 1976 in série Spore and Pollen Flora, 1950 à 1960 ; Thanikaimoni et al., 1984). Des éléments de la flore herbacée ont également été reconnus comme le Plantain d'eau, des crucifères et des renonculacées. A l'opposé des types polliniques appartenant à des groupes aujourd'hui disparus ou actuellement très localisés dans les régions chaudes du globe ont pu de la même façon être identifiés. Ce sont pour la plupart des Juglandacées de type *Carya*, *Pterocarya*, *Platycarya*, mais aussi des Ulmacées comme *Zelkova carpinifolia*.

2. LE LAC D'ILAY (JURA, FRANCE)

2.1. MINÉRALOGIE DU SÉDIMENT TOTAL

2.1.1. Les minéraux non argileux

100 échantillons appartenant aux deux colonnes sédimentaires, décrites en annexe n°7, ont été analysés. Les résultats présentés ici sont issus de la synchronisation des deux carottes. Les résultats bruts et les pourcentages sont donnés pour chaque carotte avant synchronisation en annexes n° 36 à 39 et après synchronisation en annexes n° 33 et 34. Les analyses diffractométriques permettent de retenir la composition minéralogique suivante pour les sédiments du lac d'Ilay :

- calcite et aragonite pour les minéraux carbonatés ;
- quartz, phyllosilicates et feldspaths potassiques pour les minéraux silicatés.

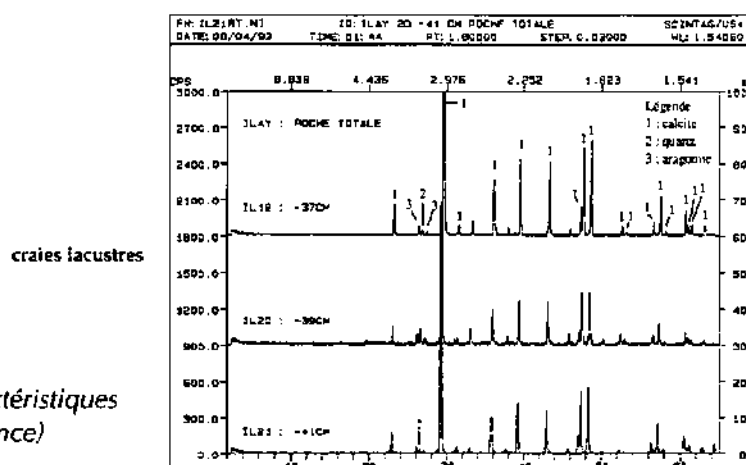


Figure 2.60 : Diffractogrammes caractéristiques des sédiments du lac d'Ilay (Jura, France)

La figure 2.60 montre un diffractogramme typique obtenu après analyse du sédiment total. La figure 2.61 détaille les intensités brutes de la "roche totale" exprimées en CPM en fonction de la profondeur ; la suivante (figure 2.62) montre la variation des pourcentages. Le sédiment est constitué à 85-90 % maximum de calcite et contient 2.5 à 7.5 % d'aragonite. Deux épisodes riches en quartz sont observés (1 % environ à - 40 cm et 2.25 % à - 5 cm). Quatre zones minéralogiques sont identifiées et détaillées en annexe n°35.

2.1.2. Analyse Factorielle en Composantes Principales des pourcentages des minéraux

La figure 2.63 montre les résultats du traitement statistique qui a été fait sur les pourcentages des minéraux de la "roche totale" du forage d'Ilay. Nous avons d'abord recherché les corrélations qui existent entre les différentes variables (minéraux) de chaque échantillon puis nous avons procédé à l'analyse multivariée. L'analyse multivariée a été

Figure 2.61 : Intensités brutes (en Coups Par Minute) des minéraux du sédiment total de la carotte courte du lac d'Ilay (Jura, France)

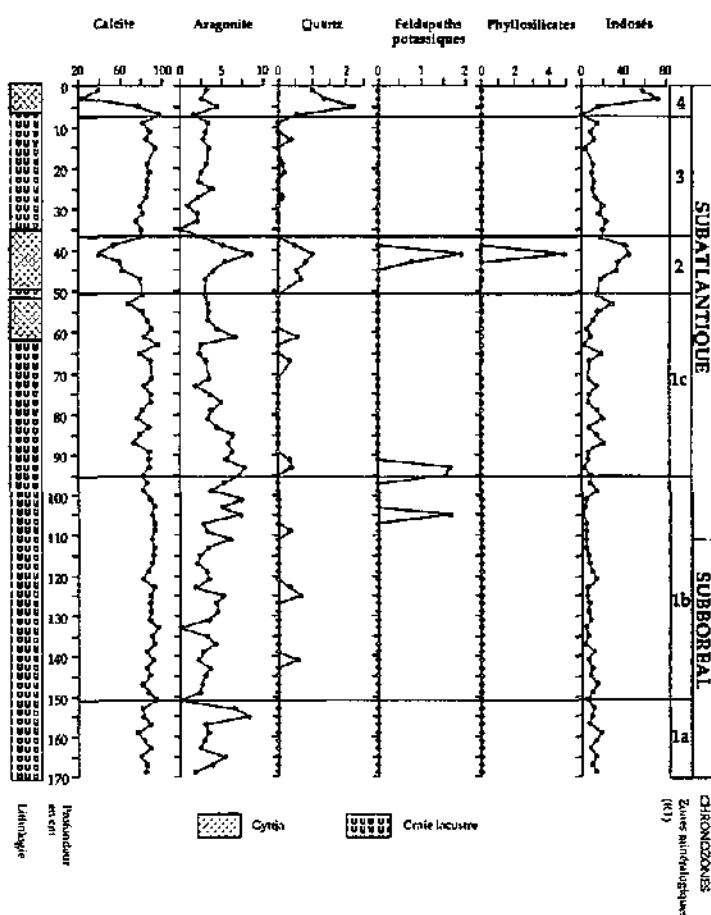
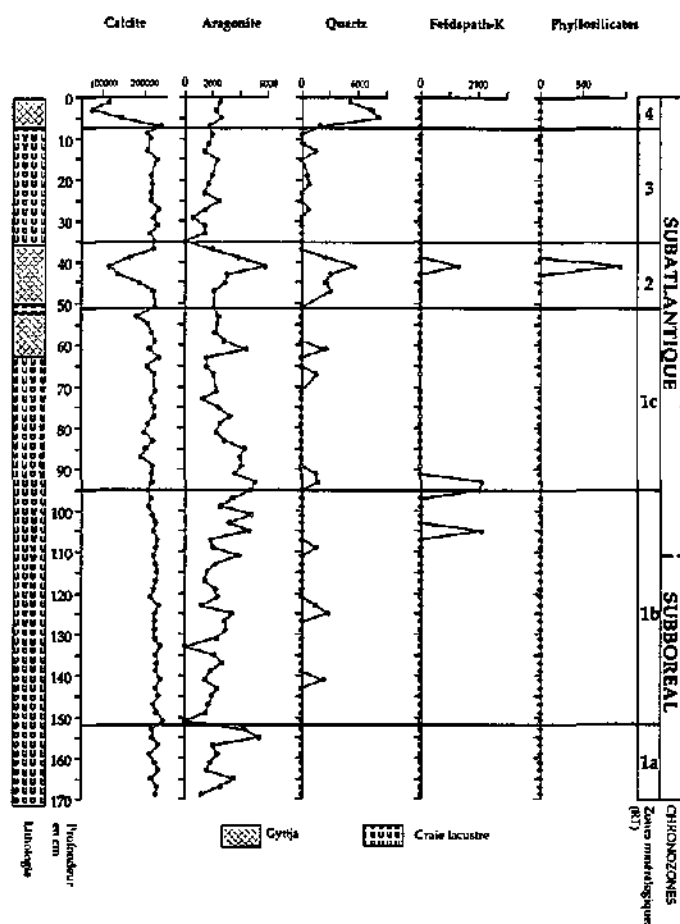


Figure 2.62 : Pourcentages des minéraux du sédiment total de la carotte courte du lac d'Ilay (Jura, France)

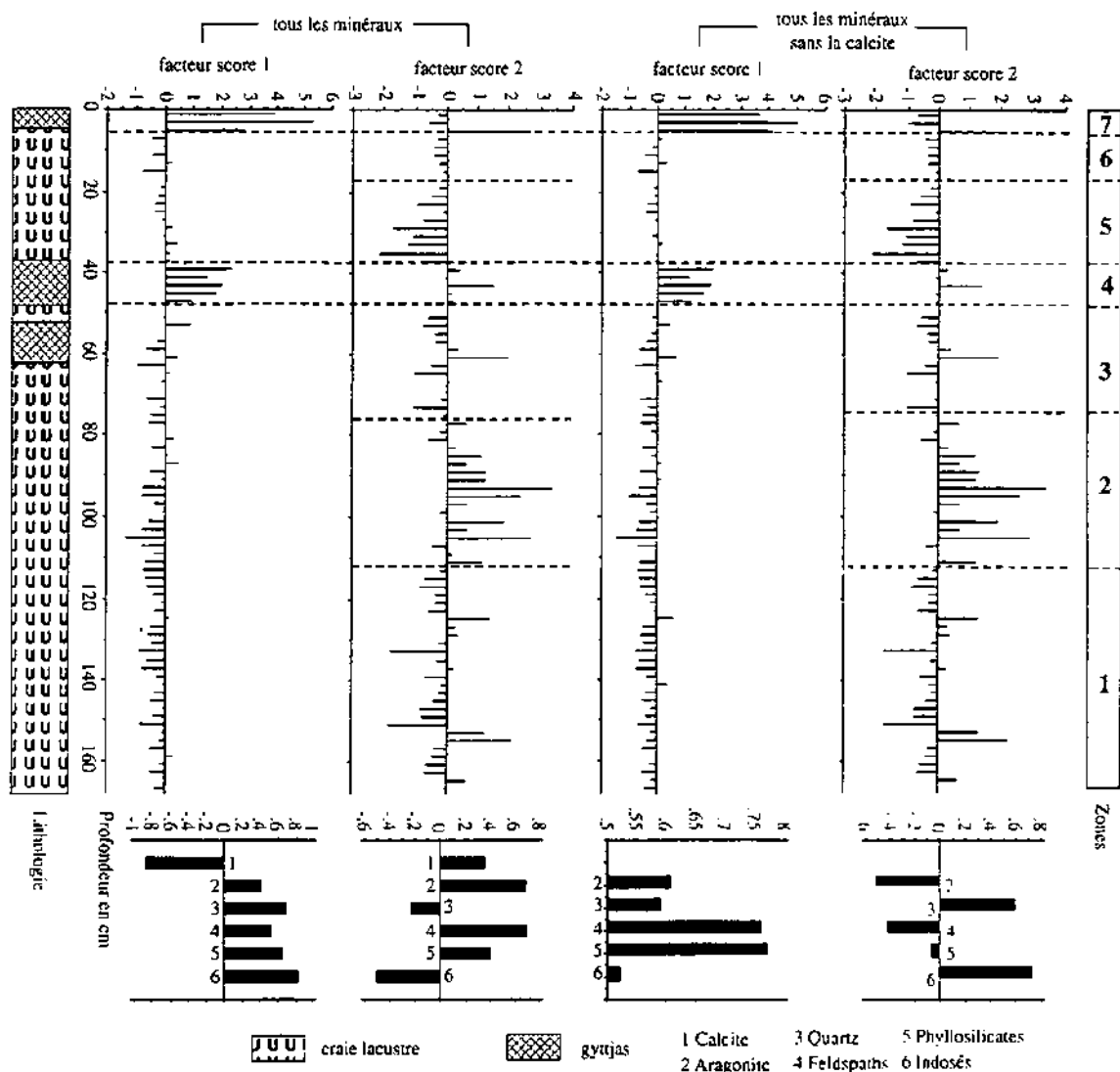


Figure 2.63 : Analyse Factorielle en Composantes Principales des pourcentages des minéraux du sédiment total d'Ilay

conduite en plusieurs étapes. La première prenait en compte la calcite alors que la seconde l'excluait.

Nous pouvons identifier clairement, à travers les premiers facteurs scores (avec ou sans calcite); 4 zones de forte contribution des échantillons. Dans les deux cas, la craie lacustre se distingue de la gyttja intercalée dans la craie et la gyttja (qui termine la séquence sédimentaire) par des contributions nettement opposées. Les seconds facteurs scores (avec ou sans calcite) montrent une variation des contributions dans la craie lacustre (3 zones - 170 et - 52 cm et 2 zones entre - 37 et - 7 cm). On remarque également que la distinction de ces zones dans la craie lacustre est liée à la contribution de la variable "feldspaths". La gyttja est, comme dans les deux précédents cas, toujours nettement différenciée (zones 4 et 7).

Les zones minéralogiques que nous avons décrites sur les profils sont objectivement confirmées par l'analyse factorielle. Ces résultats statistiques montrent également que le niveau de gyttja, en dessous de 50 cm, correspond minéralogiquement à une craie lacustre

organique ; elle se différencie très bien du niveau de gyttja compris entre - 37 et - 49 cm.

2.1.3. Zones minéralogiques et associations minéralogiques du forage d'Ilay

Les analyses minéralogiques du sédiment total permettent la distinction de quatre zones minéralogiques qui regroupent deux associations minérales distinctes.

La première association minéralogique est bien individualisée ici puisqu'elle couvre la quasi totalité de ce forage. Elle est composée de 75 à 90 % de calcite, de 5 % d'aragonite et de la présence sporadique de quartz en quantité inférieure à 0.5 %. Cette association recouvre les zones RT1(a, b, c) et RT3.

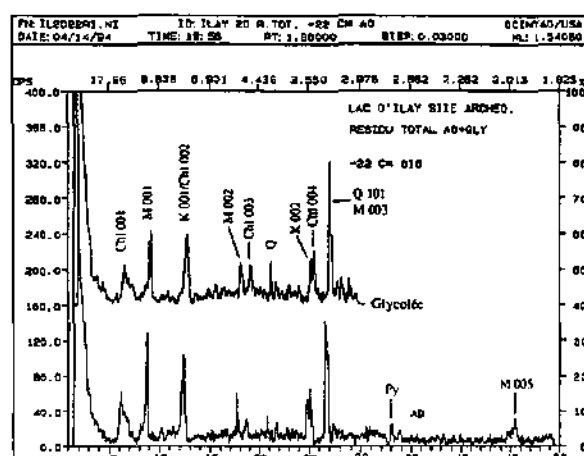
La seconde association minéralogique apparaît entre 35 et 52 cm de profondeur ; elle se distingue de la première par la présence continue de quartz (entre 0.5 et 3 %), de phyllosilicates (5 %) et d'un taux relativement bas de calcite qui peut descendre jusqu'à 20 %. Le taux d'indosés dépasse toujours 20 %. Cette association recouvre les zones RT2 et RT4.

2.2. ÉTUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX

41 échantillons ont été traités pour l'étude des minéraux argileux. La faible quantité de phyllosilicates et la relative abondance de matière organique n'a pas permis l'utilisation des fractions granulométriques < 2 et 2-16 µm. La fraction minérale décarbonatée totale a donc été utilisée. Un diffractogramme typique (figure 2.64) obtenu au cours de ces analyses est présenté ici. Les valeurs des intensités brutes enregistrées sont très faibles (figure 2.65), les données brutes sont en annexe n°41, les zones sont détaillées dans l'annexe n° 40.

Les phyllosilicates sont représentés par : la kaolinite, la chlorite et des micas.

Les minéraux en grains de la fraction minérale décarbonatée sont peu nombreux : quartz, feldspaths potassiques et albite constituent ce groupe. Seul le quartz est régulièrement rencontré. L'appellation des zones est FT-, F pour fraction et T pour totale. Ces lettres sont également suivies du numéro d'ordre de la zone en commençant toujours



Préparations orientées
(résidu total)

Figure 2.64 : Diffractogrammes caractéristiques des sédiments du lac d'Ilay (Jura, France)

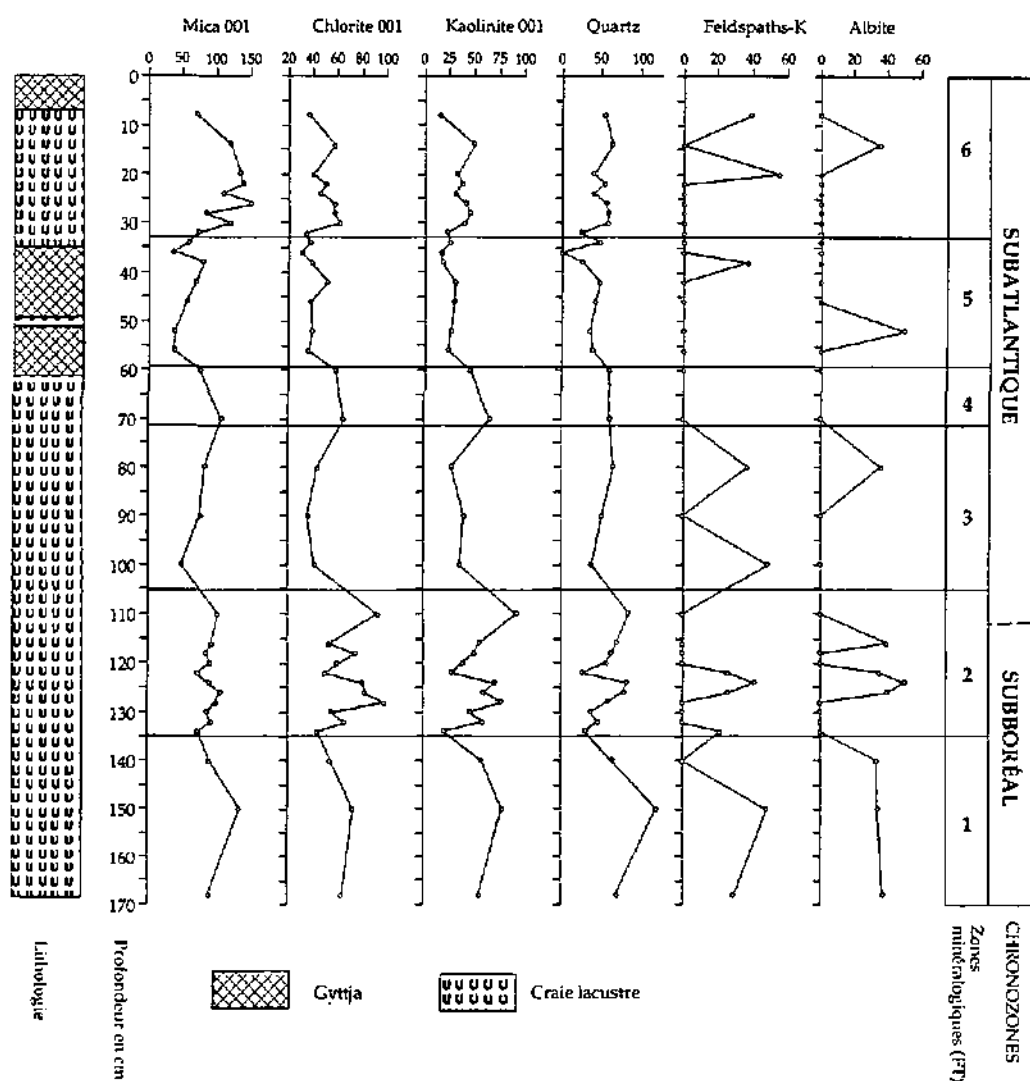


Figure 2.65 : Intensités brutes des pics des minéraux de la fraction minérale argileuse totale glycolée du forage synthétique du lac d'Ilay (Jura, France)

par la base du forage. Il est important de préciser que les intensités brutes des minéraux sont très faibles et que les amplitudes de variation des intensités sont peu importantes. Il faut être prudent car certaines intensités proviennent d'une déconvolution où l'on peut observer un "bruit de fond" important.

La figure 2.66 correspond à l'analyse statistique des intensités brutes issues du résidu insoluble total des sédiments d'Ilay. Cette analyse s'est déroulée en deux temps. Le premier correspond à la recherche des contributions des échantillons pour les intensités brutes des pics 001 des argiles et des pics 100 des minéraux en grains (cf tableau 1.2 et 1.4). Dans un second temps nous nous sommes seulement intéressé aux pics 100 des minéraux en grains.

Plusieurs zones sont difficilement identifiables en raison de faibles corrélations, mais les limites entre les zones 1 et 2 et entre les zones 4 et 5 sont les mieux marquées par des seuils de corrélation inverses. Dans la craie lacustre, entre - 37 et - 30 cm, on observe une transition qui se traduit par des seuils de corrélation bien marqués mais qui se trouvent à différentes profondeurs entre - 37 et - 30 cm.

Ce traitement statistique des données brutes permet de rendre compte de la difficulté de délimiter manuellement des zones minéralogiques. Dans les deux cas, la faible variation des intensités brutes associée à la quantité peu importante de minéraux ne facilite pas les interprétations.

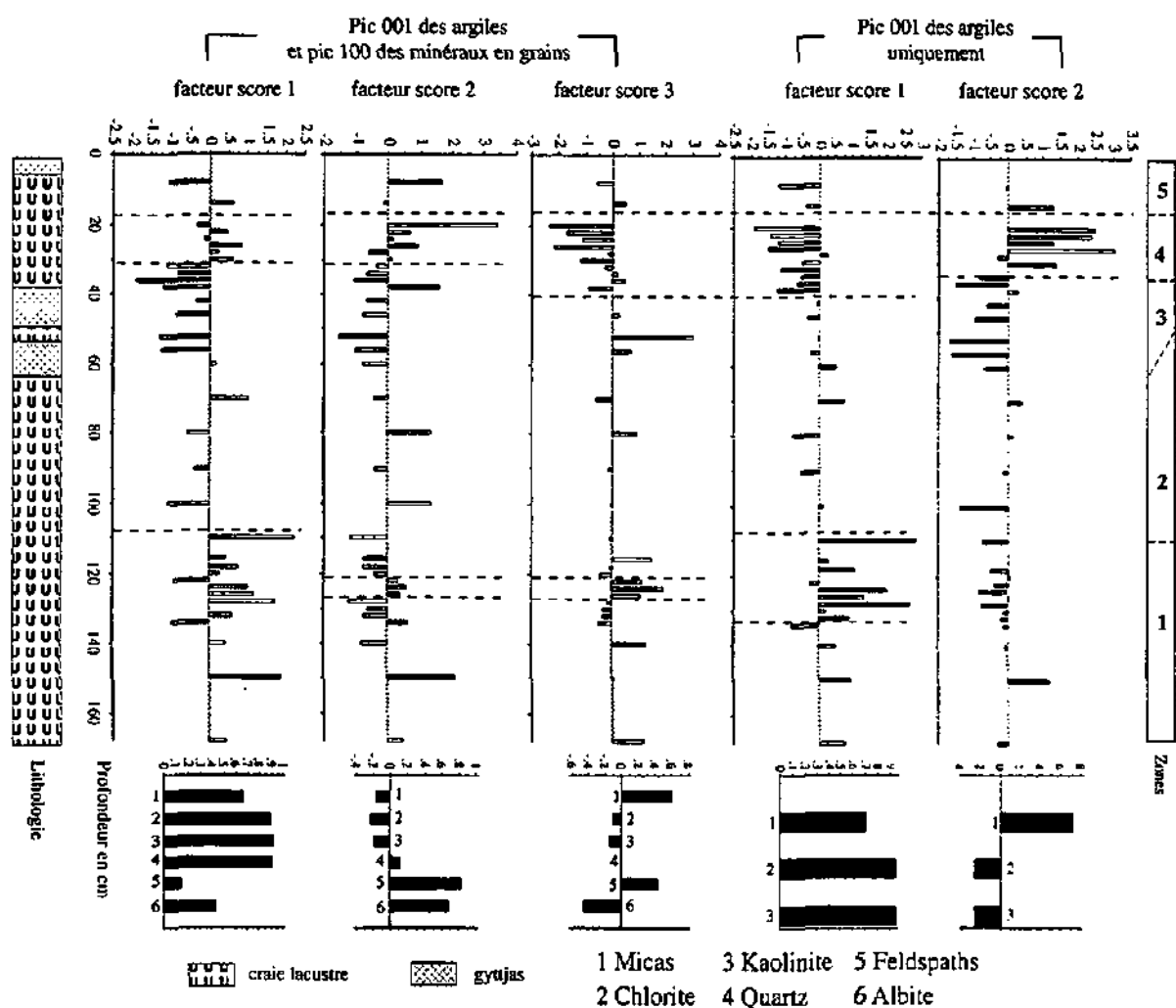


Figure 2.66 : Analyse factorielle en Composantes Principales des données brutes de la fraction totale argileuse glycolée

2.2.1. Identification des chlorites

La figure 2.67 montre la position des échantillons analysés en fonction des mesures effectuées. L'emplacement relatif des points correspond à l'intensité des pics de chlorite (à

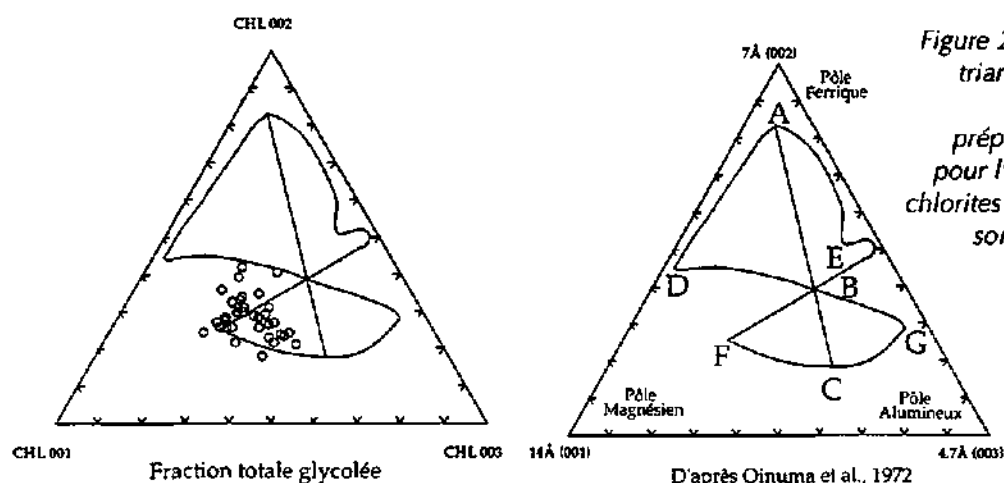


Figure 2.67 : Diagramme triangulaire des séries harmoniques des préparations orientées pour l'identification des chlorites des sédiments du sondage d'Illay (Jura, France)

4,7, 7 et 14 Å). Le second triangle fait apparaître les zones que Oinuma *et al.* ont défini en 1972. Un nuage de point, relativement peu dispersé, est centré sur le secteur BFC (pôle 4.7 et 14 Å). Les Chlorites paraissent se scinder en un groupe plus dirigé vers le pôle 14 Å, alors que le second est plutôt en direction du pôle 4.7 Å.

2.2.2. Identification des micas

Ce mode d'expression des résultats (figure 2.68) permet de mettre en évidence, comme pour les pics de chlorite, un nuage de point relativement concentré, proche du pôle M001 (10Å). Quelques points seulement se détachent de ce groupe sans en être très éloignés. D'après les travaux de Rey et Kübler (1983), les micas du site d'Ilay sont des phengites.

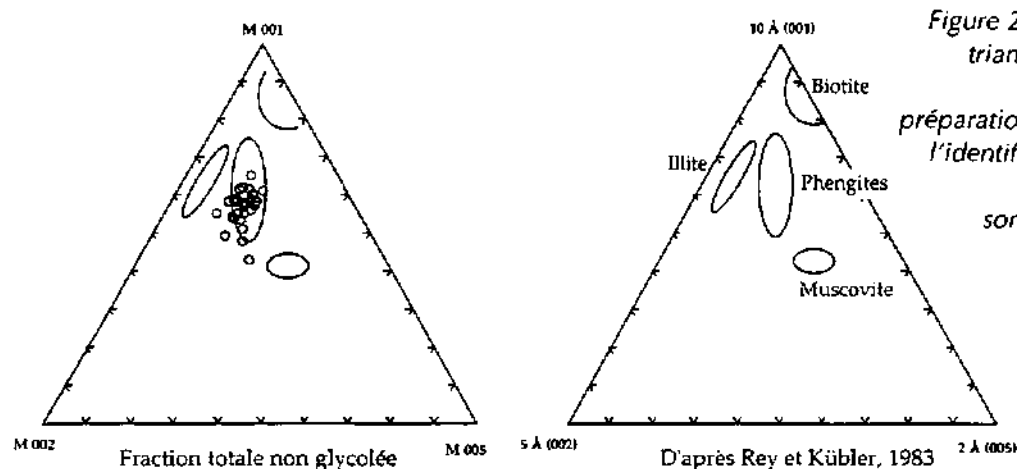


Figure 2.68 : Diagramme triangulaire des séries harmoniques des préparations orientées pour l'identification des micas des sédiments du sondage d'Ilay (Jura, France)

2.3. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION

2.3.1. Les apports de la minéralogie à Ilay

Les sédiments du forage d'Ilay sont principalement constitués de calcite, d'aragonite et enfin de quartz en proportions variables. La fraction minérale argileuse comprend : les micas (phengites), les chlorites (alumino-magnésiennes, ferro-magnésiennes) et la kaolinite ; leurs intensités sont extrêmement faibles. Les minéraux en grains ne représentent que 10 à 25 % de la fraction totale décarbonatée. Les résultats des analyses de la "roche totale" sont comparables à ceux rencontrés dans la littérature pour ce type de sédiment : des craies lacustres (Portner, 1951 ; Kübler, 1962 et 1988 ; Serruya, 1969 ; Kelts, Hsü, 1978 ; Schwalb, 1992 ; Moscariello, 1996 ; Filippi, 1996).

2.3.2. L'origine des minéraux à Ilay

La présence de nombreuses concrétions carbonatées, de types variés, témoigne de l'origine autochtone d'une partie des carbonates (Magny *et al.*, 1995) ; l'autre partie de ces carbonates provient de l'activité phytoplanctonique et bactérienne. Ces sédiments sont, à 80-90 %, constituées de carbonate de calcium. Ce taux est très voisin de celui que l'on rencontre dans la littérature : le lac de Neuchâtel contient entre 70 et 80 % de calcite (Portner, 1951 ;

Kübler, 1988 ; Schwalb, 1992) ; le Léman peut contenir entre 30 et 70 % de CaCO_3 (Serruya, 1969 ; Filippi, 1996 ; Moscariello, 1996) ; le lac de Nantua peut présenter jusqu'à 90 % de CaCO_3 (Serruya, 1969).

L'aragonite (2.5 à 5 %) provient des tests des nombreux mollusques bivalves (7 espèces) et gastéropodes (12 espèces) (SRAE, 1986 ; Magny *et al.*, 1995) régulièrement présents dans le forage. La courbe des pourcentages de l'aragonite est, par certains aspects, voisine de celle de l'effectif des mollusques, excepté entre 50 et 32 cm de profondeur où l'on observe de l'aragonite alors qu'il n'y a quasiment plus de mollusques. Cette distorsion est liée à la présence de matière organique dans ces niveaux, de plus elle n'a pas été prise en compte dans le calcul des pourcentages.

L'origine du quartz (0.5 à 1 %) est détritique. Sa présence sporadique peut être interprétée comme des apports allochtones ponctuels. Dans les niveaux organiques, le taux plus important de ce minéral est, comme pour l'aragonite, liée à la présence de matière organique. Il faut donc tenir compte du coefficient d'absorption massique de la matière organique qui est plus faible que celui de la calcite lors du calcul des pourcentages.

Les argiles, au sens stricte, sont héritées des niveaux de l'encaissant du bassin versant (Persoz et Remane, 1976 ; Persoz, 1982 ; Adatte, 1988 ; Schwalb, 1992). La représentation triangulaire adoptée par Oinuma *et al.*, (1972) permet d'apprécier la composition chimique des chlorites. Elles sont à dominante magnésienne. Les micas sont des phengites si l'on se réfère à Rey et Kübler (1983). L'association minéralogique calcite-aragonite avec quartz et feldspaths (potassiques et chalcosodiques), micas, chlorite et kaolinite rencontrée à Ilay est typiquement jurassienne.

3. SYNTHÈSE

Les objectifs de l'étude minéralogique des forages du Locle et d'Ilay ont été atteints : il existe, comme nous pouvions le penser, une évolution minéralogique de la base au sommet des forages au Locle comme à Ilay.

3.1. LE LOCLE

- L'association minéralogique calcite-dolomite-aragonite est exclusive aux faciès des argiles silteuses grises de la base des trois forages du Locle ; le quartz, les feldspaths et les phyllosilicates de ce faciès (smectoïdes, kaolinite, chlorites micas) sont hérités, en partie, des marnes de l'Oeningien moyen, du Malm et du Crétacé. La dolomite provient de l'Oeningien qui l'a lui-même héritée du Portlandien. Certains minéraux peuvent avoir une origine éolienne.

- Les nombreux échantillons analysés ont permis de caractériser minéralogiquement les différents faciès sédimentaires. Pour la première fois nous avons effectué systématiquement la diffraction des tourbes ce qui nous a montré une très grande stabilité dans leur composition minéralogique. Certains sédiments que nous avons appelé des gyttjas

(avant analyses) sont, d'après la minéralogie, des craies lacustres organiques. Les gyttjas ont révélé une certaine complexité ; elles constituent un continuum entre les craies lacustres organiques et les tourbes.

- La minéralogie des fractions granulométriques argileuses a donné la possibilité d'atteindre trois autres objectifs. Nous avons d'abord vu que la calcite, par son abondance dans les craies lacustres biogéniques, interdisait l'identification de l'amphibole et d'une certaine partie de la pyrite. Ensuite, toujours dans la craie lacustre, nous avons remarqué que les fractions argileuses montraient une variation d'intensité des minéraux (argiles et minéraux en grains) qui les constituent alors que la composition minérale du sédiment total ne montrait pas de changements. Enfin, au cours du Boréal, nous avons observé une augmentation des intensités des minéraux (argiles et minéraux en grains) qui révèle une récurrence du détritisme dans les sédiments.

- La signification de la présence des amphiboles et de la paragonite dans un forage et leur absence dans un second reste pour l'instant sans réponse.

3.2. ILAY

- L'étude de la composition minéralogique des sédiments du forage d'Ilay montre une variation du taux d'aragonite qui suit, en partie, la variation du nombre de mollusques que Magny *et al.* (1995) présentent dans leurs travaux.

- La craie lacustre se différencie très bien minéralogiquement de la gyttja. Comme sur le site du Locle, la diffraction du sédiment que nous avons appelé de la gyttja (entre 52 et 64 cm), a révélé qu'il s'agissait d'une craie lacustre organique. Les craies lacustres d'Ilay sont différentes de celles du Locle ; elles ne contiennent ni pyrite dans la "roche totale" ni dolomite dans la fraction décarbonatée. Les craies d'Ilay ont des taux de calcite plus élevés et des pourcentages de quartz plus faibles qu'au Locle. La fraction granulométrique argileuse d'Ilay est plus pauvre en minéraux et moins abondante que celle des craies du Locle. Dans les craies du Lac de Neuchâtel la dolomite est présente mais pas la pyrite alors que dans le Léman ces deux minéraux sont rencontrés. La dolomite et la pyrite ne sont donc pas des minéraux qui peuvent servir d'éléments de comparaison entre les lacs.

- La composition des gyttjas et des craies lacustres organiques est la même à Ilay et au Locle.

4. MINÉRALOGIE ET CHRONOZONATION AU LOCLE ET A ILAY

Le Pléniglaciaire :

Le sédiment qui a enregistré cette période (argiles silteuses grises) est principalement constitué de minéraux détritiques comme la calcite, l'aragonite, la dolomite, les smectoides, les micas, la kaolinite et la chlorite. Tous ces minéraux sont issus, pour la majorité, de l'érosion glaciaire des formations constituant le bassin versant.

Histoire

Le Pléniglaciaire est caractérisé par une végétation quasi inexistante ; le contenu pollinique de ces sédiments résulte de remaniements et d'apports lointains. L'absence de végétation a favorisé l'attaque des couches les plus facilement érodables. Le contenu sporopollinique des sédiments du Pléniglaciaire montre, comme la minéralogie, l'important héritage tertiaire. La caractérisation minéralogique des argiles silteuses permet, pour le forage le plus profond (LLC1), d'identifier trois variantes dans leur composition. Cette caractérisation rejoint les observations sédimentologiques et témoignent de l'absence de continuité dans la mise en place des 28 mètres de sédiment ; il y a au moins trois stades de mise en place de ces dépôts lacustres (cf chapitre 2.2 § 1.6.1), figure 2.69.

Le Dryas récent :

Les forages du Locle ne permettent pas de suivre l'évolution de la végétation de la totalité du Tardiglaciaire. Une partie seulement du Dryas récent a pu être identifiée dans le forage LLC1, alors que la fin de cette période est mieux documentée dans les forages LLC1-2 à 5. Deux étapes peuvent être individualisées en palynologie et en minéralogie :

- la première entre 1290 et 1260 cm (zone pollinique locale 2) montre une hausse des pourcentages du bouleau, du genévrier et du pin. En "roche totale" on remarque (zone RT1) une diminution du taux de quartz, des phyllosilicates et de dolomite. A l'opposé, les pourcentages de la calcite sont en hausse. La fraction inférieure à 2 μm montre une chute progressive des intensités brutes des smectoides et de la kaolinite ; le quartz augmente brusquement. Les intensités brutes des minéraux de la fraction 2-16 μm décroissent.

- la seconde entre 1260 et 1240 cm (zone pollinique locale 3) indique une diminution des pourcentages du pin, du

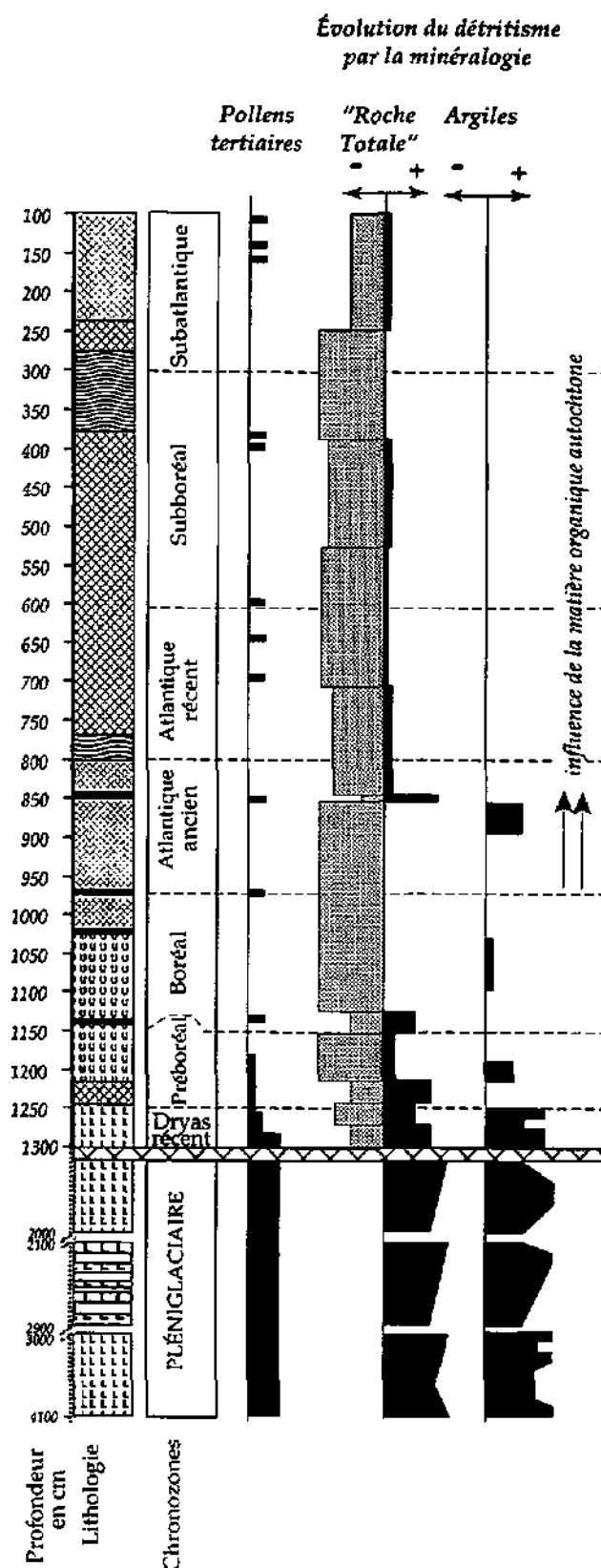


Figure 2.69 : Évolution de l'intensité du détritisme minéral et pollinique du Pléniglaciaire à l'Holocène au Locle

bouleau et du genévrier, mais ceux des cypéracées et des ombellifères augmentent. En "roche totale", les taux de dolomite et de quartz croissent en fin de zone RT1. La fraction inférieure à 2 μm montre juste une augmentation des intensités de la pyrite et des feldspaths conjointement à une baisse des intensités des smectoïdes et des micas. La fraction 2-16 μm montre très clairement une récurrence des intensités de tous les minéraux.

Les données de la minéralogie et de la palynologie conduisent à une même conclusion. La partie du Dryas récent qui est présente au Locle est scindée en deux épisodes. Le premier épisode correspond, même si l'on se trouve dans une période de dégradation climatique, à l'installation d'arbres et d'arbustes dans un environnement proche du site ; la présence de cette couverture végétale constituée par des essences pionnières, provoque une baisse importante des apports détritiques qui se traduit par une diminution de tous les minéraux (à l'exception de la calcite) dont on a vu qu'ils proviennent principalement du bassin versant. Le second épisode du Dryas récent montre une diminution des pourcentages d'arbres et une récurrence de ceux des herbacées. Cette modification de la végétation est extrêmement bien perçue dans le sédiment. On observe en effet, une augmentation de tous les minéraux détritiques hérités du bassin versant. La fin du Dryas récent se caractérise, au Locle, par une modification du contenu pollinique et minéral du sédiment qui traduit un épisode de dégradation climatique. Il s'agit d'une augmentation des apports détritiques qui ne se retrouve que dans les fractions argileuses. Ces apports sont très inférieurs à ceux qui ont marqué le Pléniglaciaire. La présence d'une végétation et de sols limite l'érosion par ruissellement ; les précipitations devaient sans doute être faibles (Magny, Ruffaldi, 1995).

Le Préboréal

Au Préboréal, la composition minéralogique du sédiment comme la végétation changent radicalement. Une tripartition bien marquée par les zones polliniques locales et les zones minéralogiques est visible dans cette période.

- La première partie du Préboréal (entre 1240 et 1215 cm) se traduit sédimentologiquement par un niveau de gyttja contenant moins de calcite, plus de quartz et d'aragonite (en roche totale) que pendant le Dryas récent. Dans cette partie, la fraction inférieure à 2 μm montre une nette augmentation des intensités du quartz et de la pyrite. Une hausse bien marquée des micas et des minéraux en grains est relevée dans la fraction 2-16. Parallèlement, on observe le développement maximal du pin et une diminution du bouleau sur le site.

- la seconde partie du Préboréal (entre 1215 et 1190 cm) se caractérise par une diminution des pourcentages de pin et une augmentation de ceux du bouleau ; le noisetier est repéré en courbe continue. Tous les indices traduisant un régime détritique diminuent. Le taux de calcite est en constante augmentation.

- La troisième partie du Préboréal (entre 1190 et 1160 cm) correspond à de nouveaux changements dans la couverture végétale. On assiste à une hausse progressive des pourcentages du noisetier, de l'orme, du chêne et une diminution des taux de bouleau. La fin du Préboréal est caractérisée minéralogiquement par une recrudescence des intensités brutes des argiles des fractions inférieures à 2 μm essentiellement.

Le Préboréal, se traduit minéralogiquement, sur le site du Locle, par trois épisodes : celui entre 1240 et 1215 cm et l'autre entre 1190 et 1160 cm sont caractérisés par un détritisme uniquement marqué dans les fractions argileuses. Ces deux épisodes suggèrent surtout une variation des apports par ruissellement. Ils sont séparés par un troisième épisode, entre 1215 et 1190 cm, correspondant véritablement au début de la sédimentation carbonatée autochtone où le détritisme est réduit. Le passage entre le premier (gyttjas) et le second épisode (craies) s'accompagne d'une hausse du niveau lacustre et d'un retour du bouleau et d'un recul des pins. Les essences formant le couvert arboré changent au cours de toute la période : les pineraies voient arriver les premiers noisetiers soulignant ainsi une amélioration générale du climat qui est, comme le montre la minéralogie, discontinue pour le Préboréal. On remarque que le détritisme est plus marqué dans les gyttjas que dans le début des craies où la palynologie suggère une détérioration climatique peu importante (Magny, Ruffaldi, 1995 ; Richard, 1996).

Le Boréal

Le Boréal (entre - 1160 et - 980 cm) est enregistré dans la craie lacustre qui peut présenter de la pyrite et un peu de quartz. La végétation de cette période, plus thermophile, montre une dominance du noisetier, de l'orme et du chêne. Le pin et le bouleau ont presque complètement disparu. Cette chronozone est scindée en trois zones polliniques locales. Les fractions minérales argileuses inférieures à 2 μm et 2-16 μm montrent entre 1090 et 1030 cm de profondeur une phase où les minéraux détritiques (argiles, minéraux en grains) et la pyrite sont en légère hausse alors que rien n'est visible dans le sédiment total. Parallèlement, la courbe des pourcentages de l'orme est en régression, celles du chêne et du noisetier sont, avec le pin, en augmentation. Sur le site du Locle, ces observations vont dans le sens d'une dégradation climatique peu marquée située vers le milieu du Boréal.

L'Atlantique ancien et récent

L'Atlantique n'est pas aussi documenté minéralogiquement que les périodes précédentes. L'Atlantique ancien (entre 980 et 790 cm) est enregistré dans de la craie lacustre organique contenant encore beaucoup de calcite avec de l'aragonite et de la pyrite, alors que l'Atlantique récent (entre 790 et 620 cm) est enregistré dans de la gyttja dont le taux de calcite est en nette diminution. Au cours de l'Atlantique ancien on observe également un retour bien marqué de la dolomite, du quartz et des phyllosilicates. Ces minéraux soulignent un retour net du détritisme.

Les fractions fines nous renseignent très bien sur le passage progressif entre les craies lacustres organiques et les gyttjas. Il est perceptible dès 890 cm alors qu'il n'est visible qu'à partir de 850 cm avec le sédiment total.

Les minéraux du bassin versant réapparaissent dans le sédiment total à partir de 7210 ± 85 BP [6183 (6008) 5869] cal. BC. La perception de ce détritisme était déjà possible à travers la présence de pollens tertiaires. La présence d'indices polliniques d'anthropisation est observable, mais pas de façon certaine, aux environs de 7210 ± 85 BP [6183 (6008) 5869] cal. BC. La présence de l'homme est incontestable peu après 6280 ± 65 B [5329 (5246) 5062] cal. BC. L'attribution de ces apports détritiques exclusivement à une dégradation du climat n'est pas concevable pour cette période en raison de la présence d'indices polliniques d'anthropisation.

Le Subboréal (figures 2.69 et 2.70)

La sédimentation qui a enregistré cette chronozone (entre 620 et 290 cm) est complète au Locle ; elle est partielle à Ilay (entre -170 et -112 cm). Minéralogiquement la sédimentation de ces deux lacs est différente, dans l'un nous avons des gyttjas et des tourbes, dans l'autre de la craie lacustre. A Ilay les variations du taux d'aragonite peuvent être partiellement corrélées à l'effectif des gastéropodes. A l'opposé, au Locle la présence continue de dolomite, de quartz et de phyllosilicates est observée. Parallèlement, les données de la palynologie montrent des apports ponctuels de pollens tertiaires provenant du bassin versant. Ces apports plus ou moins continus de matériel détritique sont liés à une érosion quasi permanente du bassin versant pendant tout le Subboréal. Cette érosion peut être soit d'origine anthropique, soit d'origine climatique ; elle peut également être une combinaison des deux. A Ilay nous ne pouvons pas tirer de telles conclusions à cause de la présence quasi permanente des indices d'anthropisation.

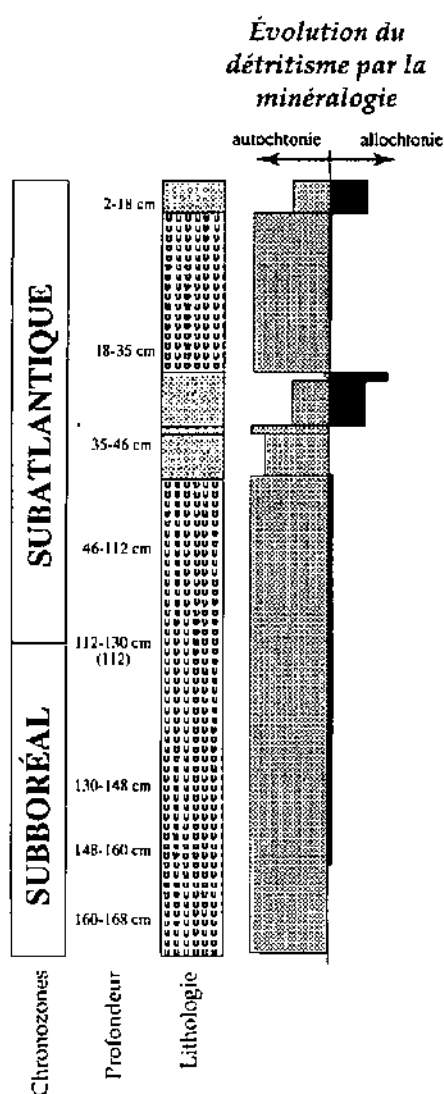


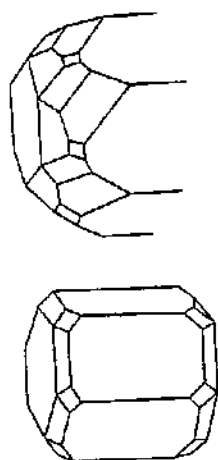
Figure 2.70 : Évolution du détritisme minéral au cours du Subboréal et du Subatlantique à Ilay

Histoire des sédiments

Le Subatlantique (figures 2.69 et 2.70)

Au Locle, la palynologie montre que la partie supérieure du Subatlantique est tronquée. Minéralogiquement cette chronozone n'est pas différente du Subboréal. A Ilay, bien que le Subboréal soit mieux documenté, on n'observe pas de variations minéralogiques importantes dans la zone qui correspond au Moyen Age et au Petit Age Glaciaire. De plus, si une variation avait été observée, nous n'aurions pas pu l'attribuer à une phase de dégradation climatique de manière certaine, car l'impact anthropique y est relativement fort et constant. Cette action sur la végétation (et donc sur la pluie pollinique) masque les effets du climat. La variation minéralogique la plus marquée concerne la présence de deux niveaux de gyttjas (entre -37 et -49 cm et entre -7 et 0 cm). D'après Magny *et al.*, (1995), ces niveaux correspondent à des phases d'abaissement du niveau du lac dont l'origine est liée à des fluctuations climatiques. On peut donc en conclure que la palynologie et la minéralogie ne sont pas suffisantes pour mettre en évidence des épisodes climatiques de manière certaine dès que l'impact humain devient trop important.

A l'instar d'autres auteurs (Finney *et al.*, 1968 ; Finger *et al.*, 1984 ; Dean, 1993 ; Bertaux *et al.*, 1996), les variations minéralogiques observées au Locle peuvent être interprétées comme une réponse sédimentologique aux changements climatiques pour les périodes antérieures à l'Atlantique. Finney *et al.*, 1968 a étudié la minéralogie de la fraction inorganique des tourbes de deux haut-marais. Le matériel contient 45 % de particules < à 2 µm, 15 % entre 2-6 µm, 30 % entre 6-20 µm. Les minéraux rencontrés sont : le quartz et les feldspaths dans les fractions supérieures à 2 µm. L'opale (quartz) d'origine biologique (diatomées, prêles, laïches) dominait les minéraux dans certaines couches de tourbe. La fraction argileuse inférieure à 2 µm était composée de kaolinite, d'illite, de vermiculite, de quartz et de feldspaths. Finney *et al.*, (1968) expliquent la présence de ces minéraux dans la tourbe par des apports éoliens. Au Locle comme à Ilay, les principaux apports détritiques proviennent de l'érosion du bassin versant. Actuellement il n'est pas possible d'apprécier la part des apports détritiques d'origine éolienne dans les sédiments du Locle et d'Ilay. Mais la présence de certains minéraux dans les sols de la région locloise Pochon (1978), en particulier, est expliquée par des apports éoliens.



Deux formes courantes de l'apatite
 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$
d'après Foucault et Raoult, 1995

Géochimie



Photographie du plan d'eau du lac d'Ilay : au premier plan les phragmites colonisant la zone littorale du lac près de l'île qui se trouve à quelques mètres sur la gauche (P. Schoellammer, 1994)

Composition chimique des sédiments

La reconstitution des paléo-environnements est généralement basée sur l'étude de biomarqueurs comme les pollens, les ostracodes, les diatomées ou sur l'étude des isotopes $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ et ^2H . Dans le chapitre précédent, nous venons de voir que les fluctuations climatiques ont entraîné des changements dans la composition minérale des sédiments. On peut penser que ces fluctuations climatiques ont provoqué des variations de mobilisation des éléments chimiques suite à des intensités d'érosion variables et/ou suite à une complexation par différents ligands directement ou indirectement induite par la végétation et les facteurs climatiques (Sondag *et al.*, 1992). La pluviosité et la température sont les facteurs principaux contrôlant la solubilisation de nombreux éléments comme Si, Al, Na, K, Ca, Mg... provenant de la couverture pédologique et des affleurements du substrat (Gibbs, 1970 ; Gac, 1979 ; Sondag *et al.*, 1993).

Mais les changements de la composition chimique des sédiments ne peuvent être appréhendés qu'après identification des producteurs dans les différents secteurs du bassin versant. Seules les tourbières ont un sédiment qui est formé in situ ; la particularité des sédiments lacustres est qu'ils sont influencés par les apports du bassin versant (Mc Kereth, 1965, 1966). Dans le cas d'un lac méromictique, les transformations se font déjà dans les eaux réduites. Dans le cas d'un lac dimictique, les sédiments de sub-surface sont le siège d'une activité intense des bactéries et des organismes fouisseurs. En fonction de la porosité et de la perméabilité, les couches sédimentaires sous-jacentes deviennent anoxiques suite à la production de méthane et à la réduction des sulfates en sulfures (pyrite), même si les couches supérieures ne montrent qu'un déficit en oxygène minime.

Composition chimique

De nombreuses études géochimiques ont souvent été réalisées dans le but de mesurer l'influence humaine sur la production sédimentaire d'un bassin versant. Pour cela, les efforts d'analyse se concentrent sur les éléments traces de forages relativement courts (Livingstone, 1962, 1963 ; Serruya, 1969 ; Davaud, 1976 ; Kübler *et al.*, 1979 a, b ; Livett *et al.*, 1979 ; Ergin, 1982 ; Viel, 1983 ; Pittet *et al.*, 1990). L'analyse des sédiments de sub-surface permet également d'étudier les phénomènes de diagenèse précoce (Davaud, 1976 ; Emerson, 1976) et les problèmes d'eutrophisation (SRAE, 1986 ; Viel, 1983 ; Frinck, 1969). Un nombre plus restreint d'études porte sur des séquences lacustres plus anciennes (Serruya, 1969 ; Weber, 1981 ; Pittet *et al.*, 1990 ; Jantschik, 1991 ; Schwalb, 1992 ; Dean, 1993 ; Zeroual, 1995 ; Bertaux *et al.*, 1996 ; Moscariello, 1996). De récentes études ont montré l'importance du rôle joué par le détritisme et par les provinces émettrices (Di Giovanni, 1994 ; Campy *et al.*, 1994 ; Gay, 1995 ; Bichet, 1997). Ainsi, la variation des apports chimiques des éléments des bassins versants du Locle et d'Ilay ont dû accompagner les changements climatiques quaternaires et les modifications de végétation qu'ils ont entraînés. Pour cette raison, nous présumons que des signaux chimiques liés à ces variations peuvent être perçus dans ces sédiments. Le but de ce chapitre est d'essayer d'identifier des tels signaux sur les sites du Locle et d'Ilay.

1. LES ANALYSES CHIMIQUES DES SONDAGES DU MARAIS DU COL-DES-ROCHES

1.1. LES ANALYSES ÉLÉMENTAIRES SUR SÉDIMENT TOTAL

Les premiers paramètres mesurés sont : la porosité et la teneur en eau. Il ne nécessitent aucun appareillage particulier si ce n'est une balance, une étuve et une seringue. Ensuite, ces mesures sont suivies par les analyses élémentaires du carbone, de l'hydrogène et de l'azote sur le sédiment total et sur le sédiment décarbonaté (cf. : partie 1, chapitre 2 "Méthodes et Techniques", figure 1.22). Les 156 échantillons analysés par diffraction X ont été réutilisés. Les résultats bruts sont reportés dans l'annexe n° 42. La variation des paramètres mesurés est représentée en fonction de la profondeur. Le principe de zonation utilisé en palynologie et en minéralogie a de nouveau été appliqué ici ; les zones géochimiques sont détaillées dans l'annexe n°43.

1.1.1. Forage LLC1

Les variations observées permettent d'identifier 5 zones géochimiques dans ce forage. La zone géochimiques G1 couvrant les argiles silteuses du Pléniglaciaire (figure 2.71) s'identifie par sa teneur en eau (20 - 22 %), son taux de carbone total proche de 10 % et un pourcentage de résidu insoluble inférieur à 20 %. Le sédiment de cette période est pauvre en matière organique (1 %) exceptés deux niveaux plus organiques à 32 et 36 m de profondeur.

La sous-zone G1d correspond aux gyttjas comprises entre -20 et -21 m de profondeur. Cette sous-zone est caractérisée par 70 % d'eau pour une porosité voisine de 80%. Le taux de résidu insoluble est légèrement plus faible que dans les argiles silteuses, mais les taux de carbone organique et total sont plus élevés. La sous-zone G1f (Dryas récent) montre les mêmes caractéristiques que G1d. Nous avons vu en palynologie que le niveau de gyttjas

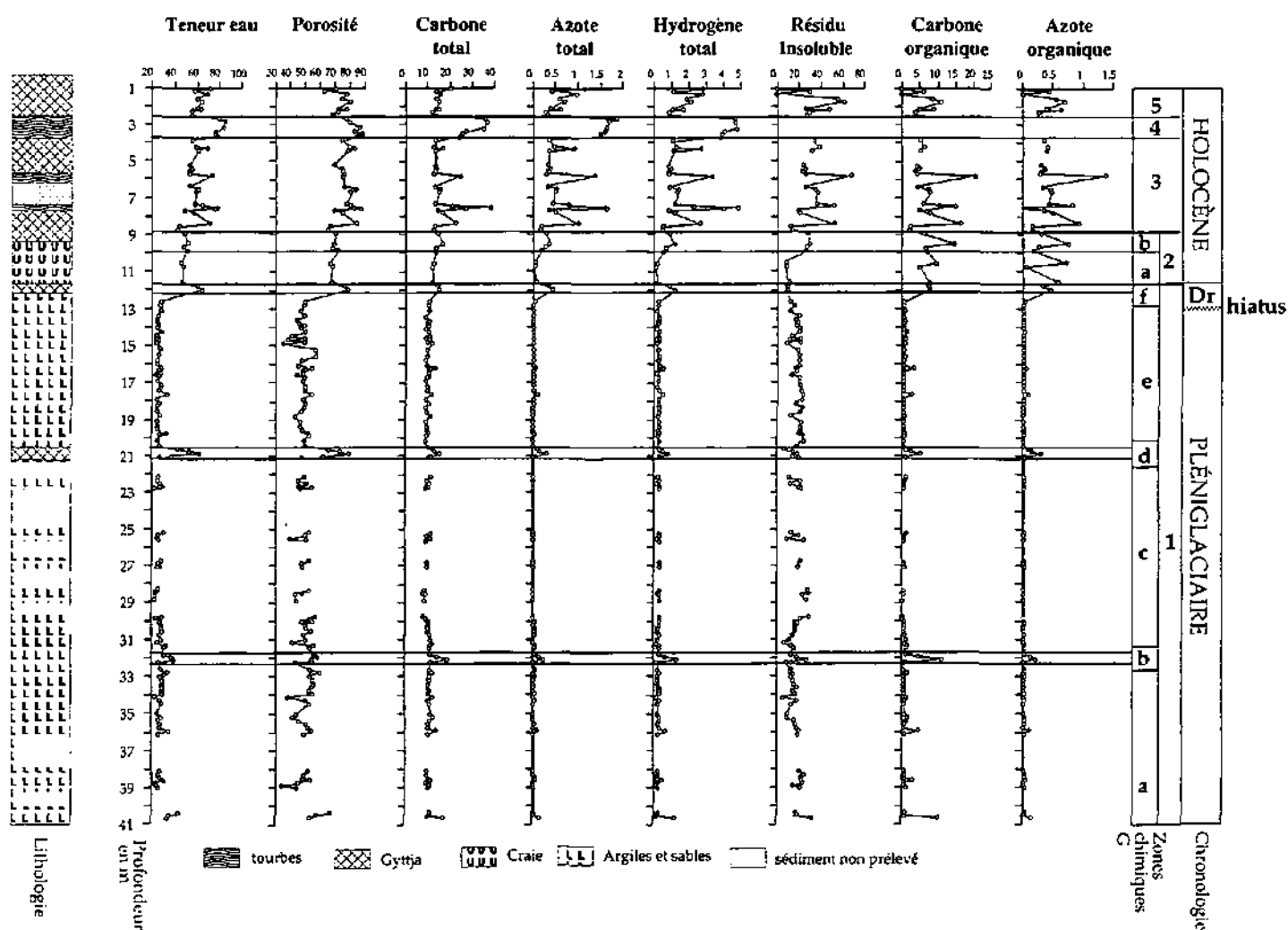


figure 2.71 : Mesures des teneurs en eau, porosités et analyses élémentaires (en pourcents) des sédiments du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches

(G1d), d'après son contenu pollinique, n'est pas en place en raison d'une pollution intervenue au moment du carottage.

L'Holocène montre trois parties distinctes. La première, la zone G2 qui correspond aux craies lacustres, et caractérisée par 12 % de carbone total, 5 % de RI, 5 % de carbone et une teneur en eau voisine de 50 %. La seconde correspond aux zones G3 et G5, elles montrent des valeurs très élevées pour le carbone (40 %) et l'azote total (2 %). Dans les zones G3 et G5, les valeurs du carbone total peuvent être légèrement supérieures à celles de la zone G2. Les zones G3 et G5 soulignent très bien les intercalations tourbeuses dans les gytjas. La troisième (zone G4) correspond aux niveaux de tourbes ; elle se différencie très nettement par sa teneur en eau qui dépasse les 80 % et son taux de carbone total qui atteint 40 %.

En résumé, on remarque que la teneur en eau et la porosité décroissent avec la profondeur. Ces paramètres sont élevés dans les tourbes (où les taux de carbone, de résidu insoluble sont plus importants) et relativement bas dans les argiles silteuses basales.

Composition chimique

1.1.2. Forage LLC1-2 à 5

Les dosages effectués sur les forages LLC1-2 à 5, jumeaux de LLC1 (figure 2.72) concernent les dépôts lacustres compris entre 8,45 m - 13 m. La période chronologique couverte va du Dryas récent à l'Atlantique ancien. Les profils ont été subdivisés en 5 zones géochimiques (G). Les résultats bruts des analyses sont reportés dans l'annexe n° 44 et les zones sont décrites dans l'annexe n° 45.

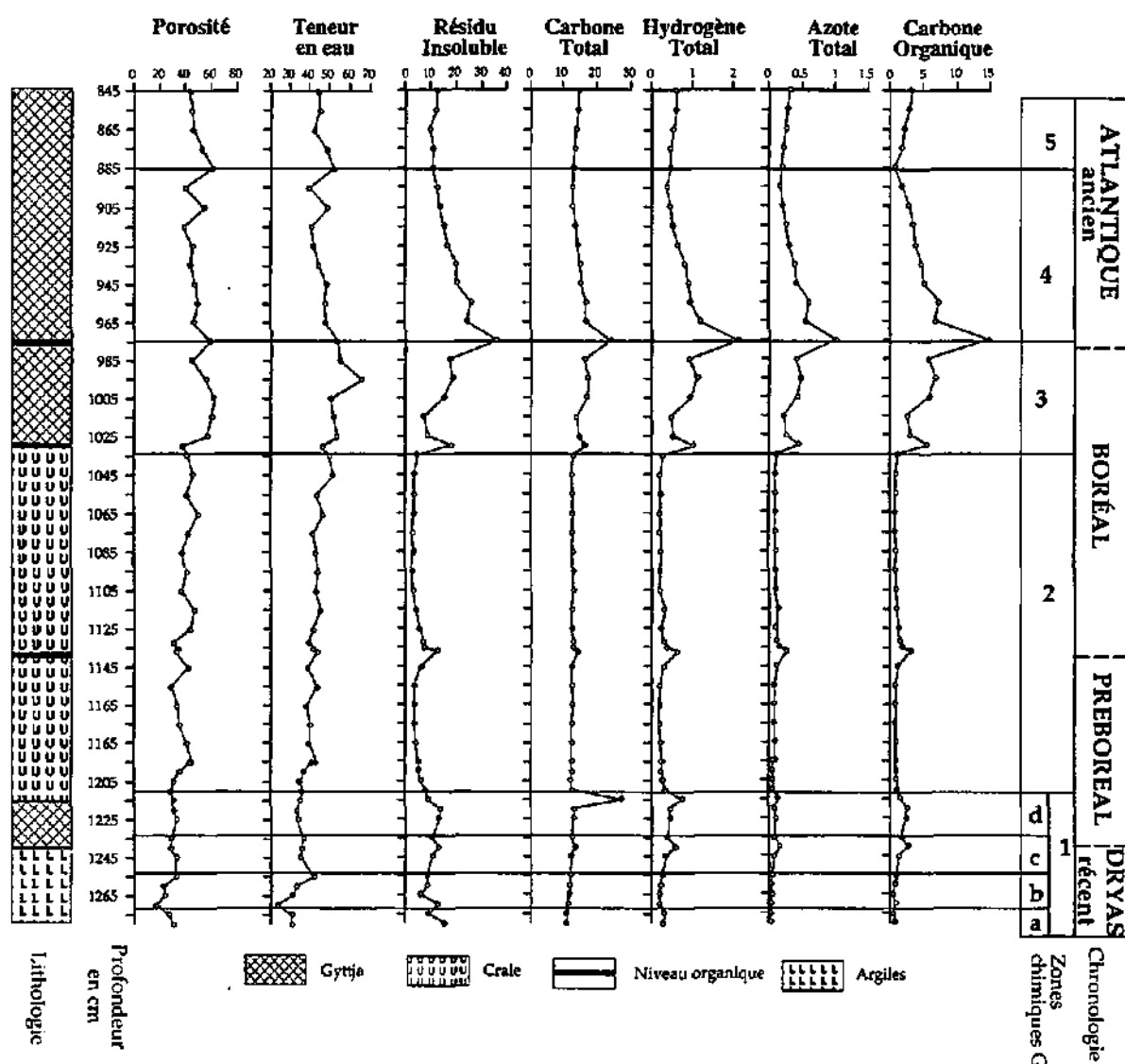


Figure 2.72 : Mesures des teneurs en eau, porosités et analyses élémentaires (en pourcents) des sédiments des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches

Les argiles silteuses grises montrent d'abord de 1280 à 1267 cm, une diminution de la porosité, de la teneur en eau et du résidu insoluble, puis les taux augmentent jusqu'à 1240 cm.

Les craies lacustres entre 1215 et 1025 cm (zone G2) montrent une tendance croissante de la porosité et de la teneur en eau. Les valeurs du résidu insoluble sont moins élevées que dans les argiles silteuses grises à l'exception des niveaux organiques à 1137 et 1025 cm.

Le passage des craies lacustres aux gyttjas montre une hausse de tous les paramètres mesurés. Les valeurs maximales sont atteintes dans les niveaux organiques à 1025 et 975 cm (zone G3). Les gyttjas intercalées entre les argiles silteuses et les craies lacustres montrent une hausse du résidu insoluble et du carbone organique. Ponctuellement, on observe à 1215 et 1240 cm des valeurs plus élevées du carbone, de l'hydrogène et de l'azote total.

1.1.3. Forage LLC2

Les analyses physiques (porosité et teneur en eau) et élémentaires du forage LLC2 permettent de distinguer trois zones principales détaillées dans l'annexe n° 47. Les résultats sont présentés sur la figure 2.73. Les données de bases sont rassemblées dans l'annexe n° 46.

La première partie de ce forage, constituée par les argiles silteuses grises et les gyttjas, se caractérise par une tendance croissante de la porosité et de la teneur en eau de 13 à 6.60 m. L'amplitude des variations est faible voire nulle pour le C, H, N total. A l'opposé, le

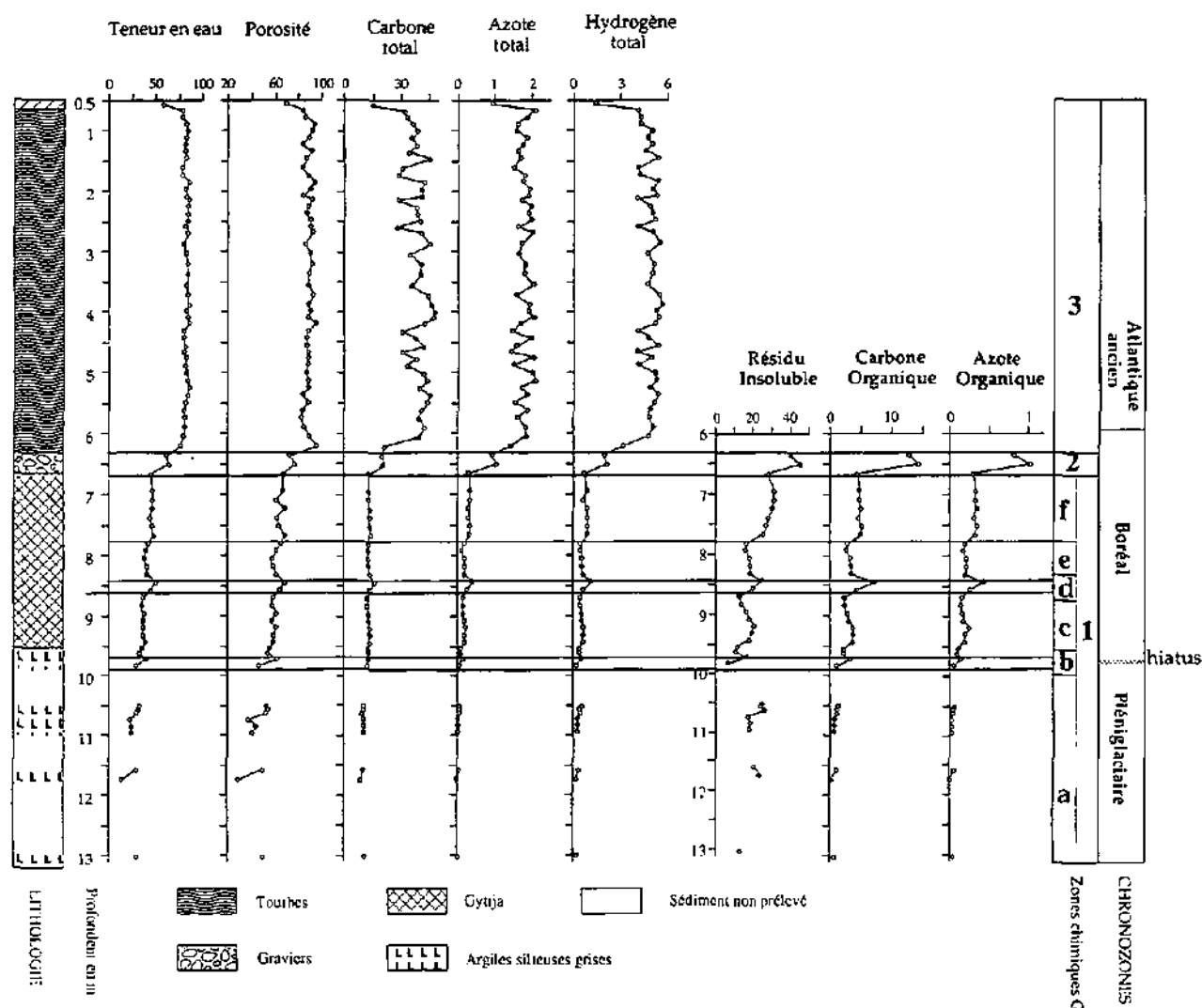


Figure 2.73 : Mesures des teneurs en eau, porosités et analyses élémentaires (en pourcentages) des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches

Composition chimique

résidu insoluble, le carbone et l'azote organique montrent des variations qui permettent de subdiviser les argiles silteuses grises et les gyttjas en plusieurs sous-zones.

La seconde partie de ce forage est constituée par des niveaux de sables et de graviers dans une matrice argileuse. Vers 6.50 m, tous les paramètres mesurés montrent une très nette augmentation.

La troisième partie du forage correspond à des tourbes (-0.5 et -6.25 m). La teneur en eau est assez élevée (75 %) et une porosité comprise entre 80 et 90 %. Le taux de carbone total atteint au maximum 35 % dans ces tourbes. Les pourcentages d'azote total (2 %) et d'hydrogène (4%) oscillent autour de ces valeurs.

En résumé, on remarque que la teneur en eau et la porosité sont constantes dans les 6 mètres de tourbe puis décroissent de manière régulière dans la gyttja et les argiles alors que le taux de carbone total est constant dans ces faciès sédimentaires. En revanche, on observe une variation du taux de carbone organique dans ces sédiments.

1.2. LA SPÉCIATION DES CARBONATES : LES ANALYSES CHIMIQUES DE LA PHASE ACIDO-SOLUBLE

Le matériel utilisé pour l'étude minéralogique du sédiment total a subi le traitement par l'acide chlorhydrique à chaud pour en étudier les éléments liés à la phase carbonatée (cf. : partie 1, chapitre "Méthodes et Techniques"). La digestion du sédiment par HCl solubilise d'abord les cations attachés à la phase carbonatée mais également une partie des cations et anions provenant des phyllosilicates, des sulfures et des sulfates, de la matière organique, des phosphates, de la silice amorphe, des hydroxydes de fer et d'aluminium (Kübler *et al.*, 1979 a, b). Dix éléments majeurs ont été recherchés et mesurés : Ca, Mg, Sr, SiO₂, Fe, Al, Na, K, Mn, PO₄.

1.2.1. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble du forage LLC1

Les mesures n'ont, en principe, pas concerné les niveaux les tourbes ; 145 échantillons du forage LLC1 ont donc été analysés. Les valeurs brutes se trouvent dans l'annexe n° 42. Les résultats, sous forme de pourcentages pour chaque élément, sont présentés en fonction de la profondeur de prélèvement sur la figure 2.74. On peut distinguer 4 zones géochimiques.

1.2.2. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble des forages LLC1-2 à 5

Les analyses des forages LLC1-2 à 5 permettent de faire un zoom précis sur le passage argiles silteuses grises (zone G1)-craies lacustres (zone G2) du forage LLC1 de la figure 2.75. Les 86 échantillons ont été analysés. Les données brutes issues des analyses sont dans l'annexe n° 44. La variation des paramètres mesurés, représentés en fonction de la profondeur, permet de différencier 5 zones géochimiques.

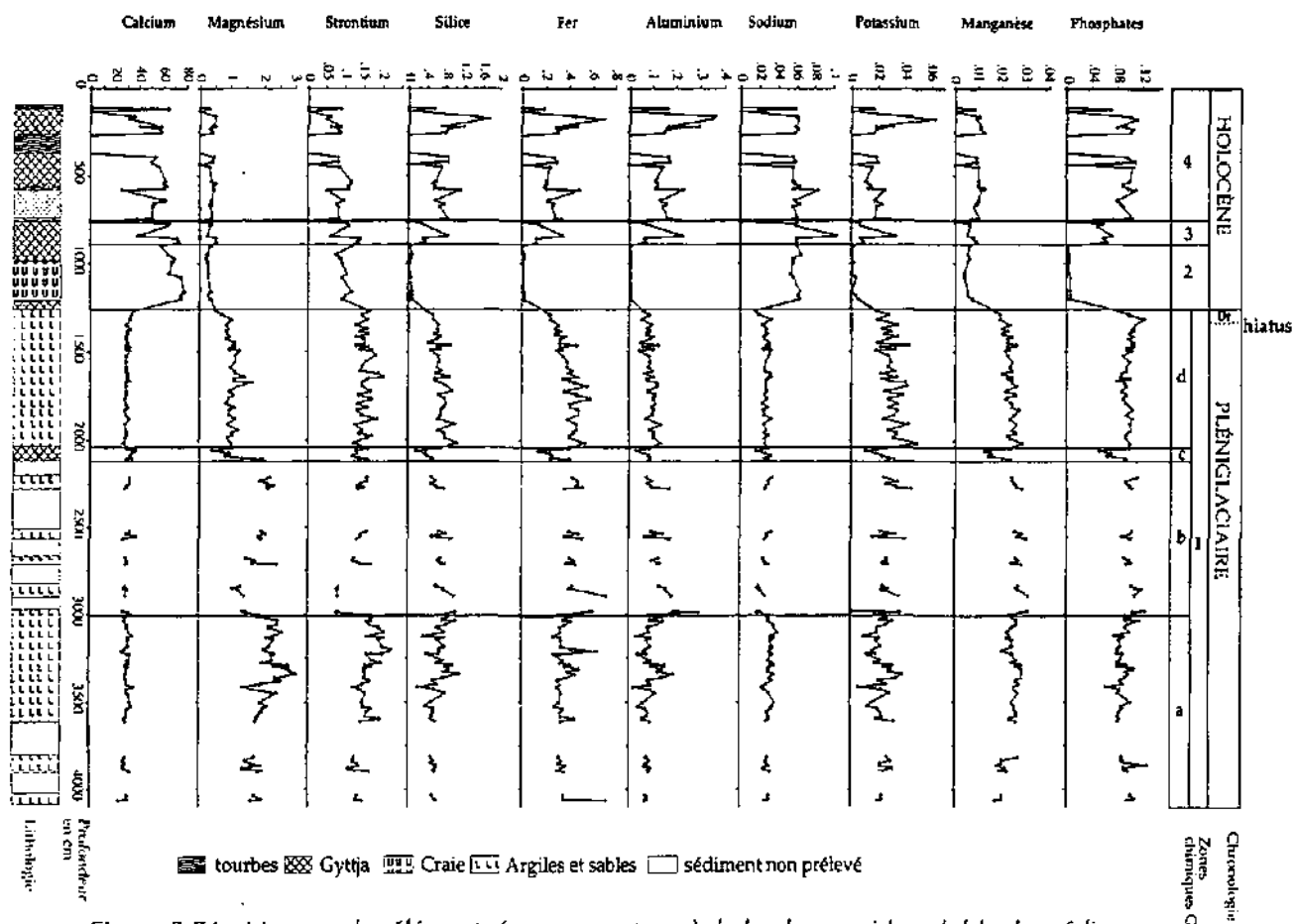


Figure 2.74 : Mesures des éléments (en pourcentages) de la phase acido-soluble des sédiments du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches

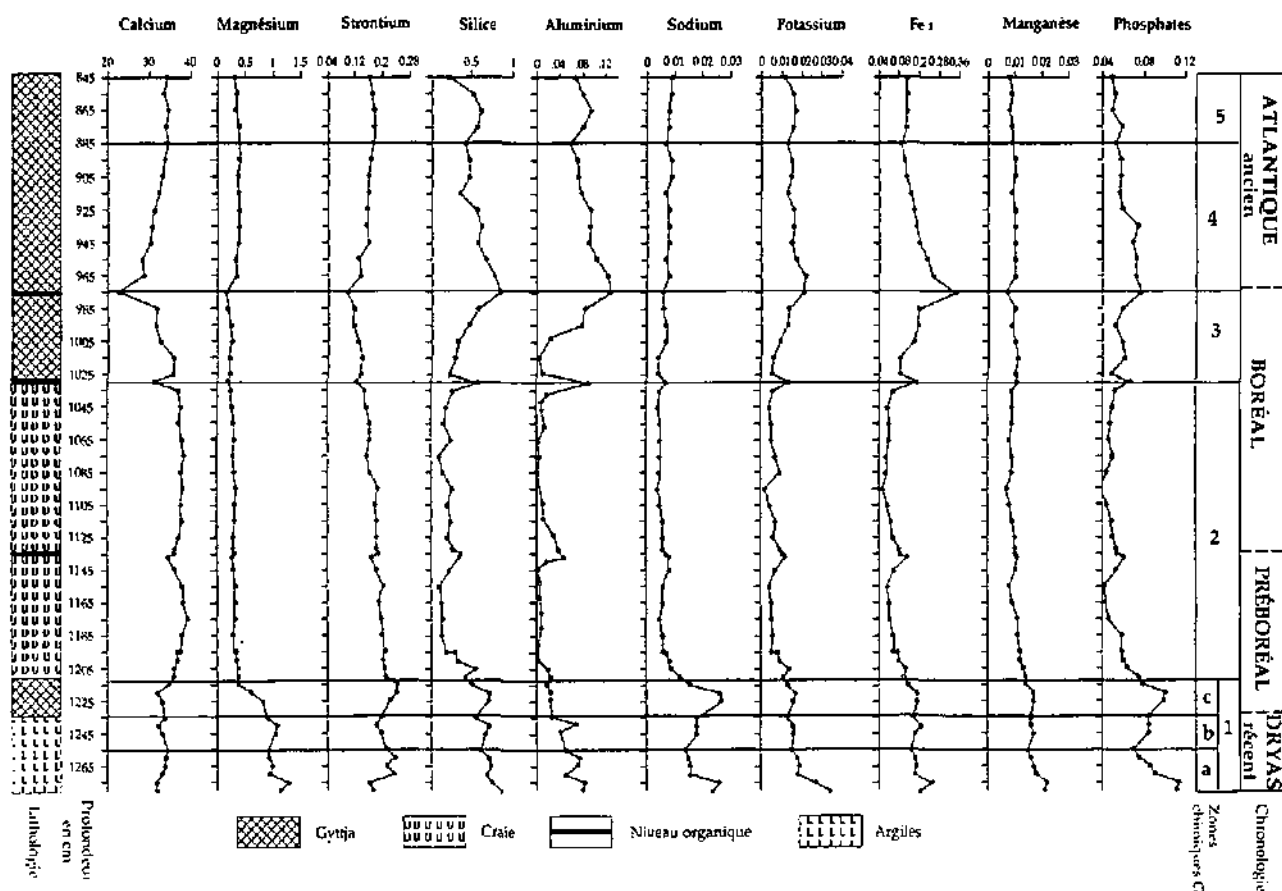


Figure 2.75 : Mesures des éléments (en pourcentages) de la phase acido-soluble des sédiments du forage LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches

Composition chimique

1.2.3. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble du forage LLC2

35 échantillons prélevés dans les argiles silteuses grises, les gyttjas et les sables à matrice argileuse entre -13 et -6 m de profondeur ont été analysés. En revanche, les tourbes ne l'ont pas été. Les données brutes se trouvent dans l'annexe n° 46.

La variation des éléments chimiques mesurés permet de distinguer 2 zones géochimiques dont une peut être scindée en plusieurs sous-zones, figure 2.76.

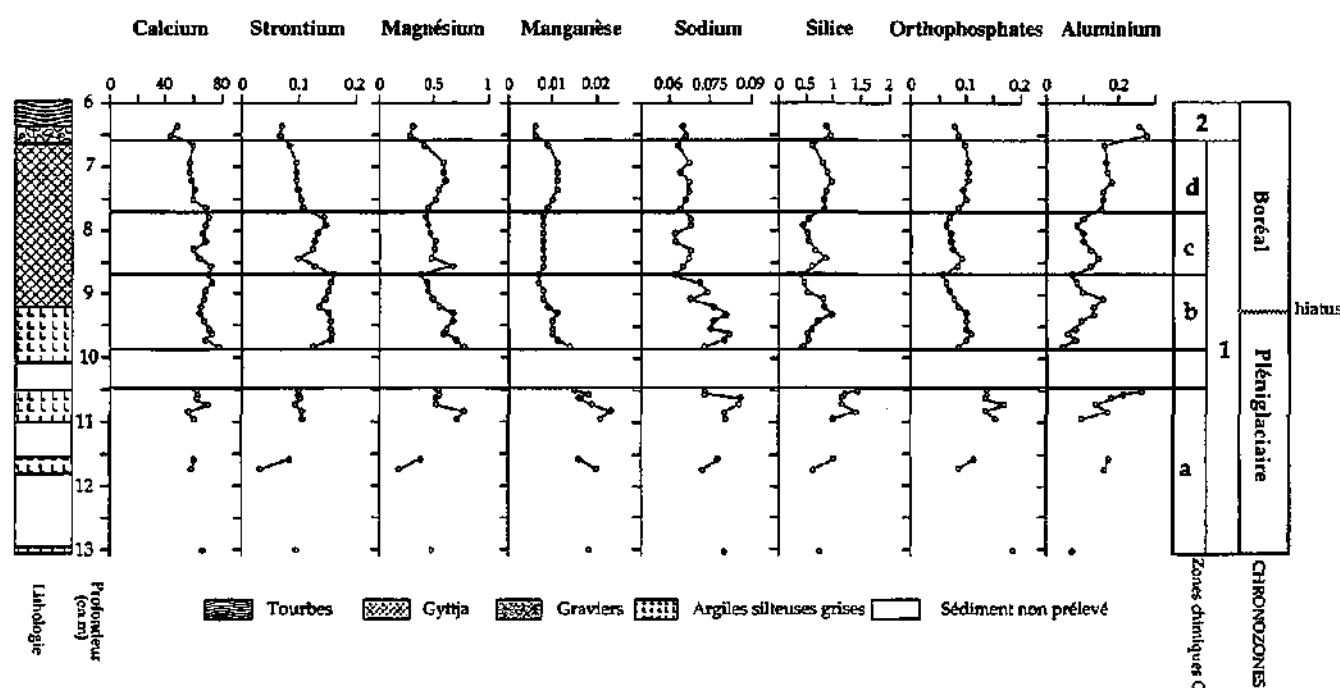


Figure 2.76 : Mesures des éléments (en pourcentages) de la phase acido-soluble des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches

1.2.4. Comparaison des zones géochimiques des trois forages du Locle

Bien que contrastées, les zones chimiques identifiées sur ces trois forages appartiennent à un même bassin sédimentaire ; elles relatent nécessairement une histoire géochimique commune exprimée différemment d'un forage à l'autre.

La concentration en manganèse du forage LLC2 est comparable à celle qui a été mesurée dans les forages LLC1-2 à 5. Par contre, les taux des éléments Al, Na et PO_4 du forage LLC2 sont supérieures à celles des forages LLC1 et LLC1-2 à 5.

- les argiles silteuses grises sont caractérisées par un taux relativement homogène de calcium et par la présence variable de magnésium toujours en quantité supérieure à 1 %. Les valeurs moyennes des autres éléments sont stables dans cette unité lithologique : la silice (0.5 %), le strontium (environ 0.15 %), le potassium (0.02 - 0.04 %), l'aluminium (0.1 %), le fer (0.4-0.5 %) et les orthophosphates (0.1 %). Ce faciès sédimentaire est présent à la base des trois forages avec des valeurs comparables.

- Les craies lacustres des forages LLC1 et LLC1-2 à 5 sont caractérisées par des concentrations en calcium et en sodium plus élevées que dans les argiles silteuses. A

l'opposé, la concentration des éléments Mg, K, Fe, Al est très inférieure à celle du faciès argileux.

- Les craies organiques se distinguent très bien dans le forage LLC1-2 à 5 (zone G 3). Le taux de calcium diminue sensiblement ; en revanche les concentrations en Si, Al, K Fe et PO₄ sont en hausse. Les valeurs ne sont pas aussi élevées que dans les argiles. Les craies organiques se différencient des argiles silteuses et des autres craies par les taux de Mg, Na, Mn.

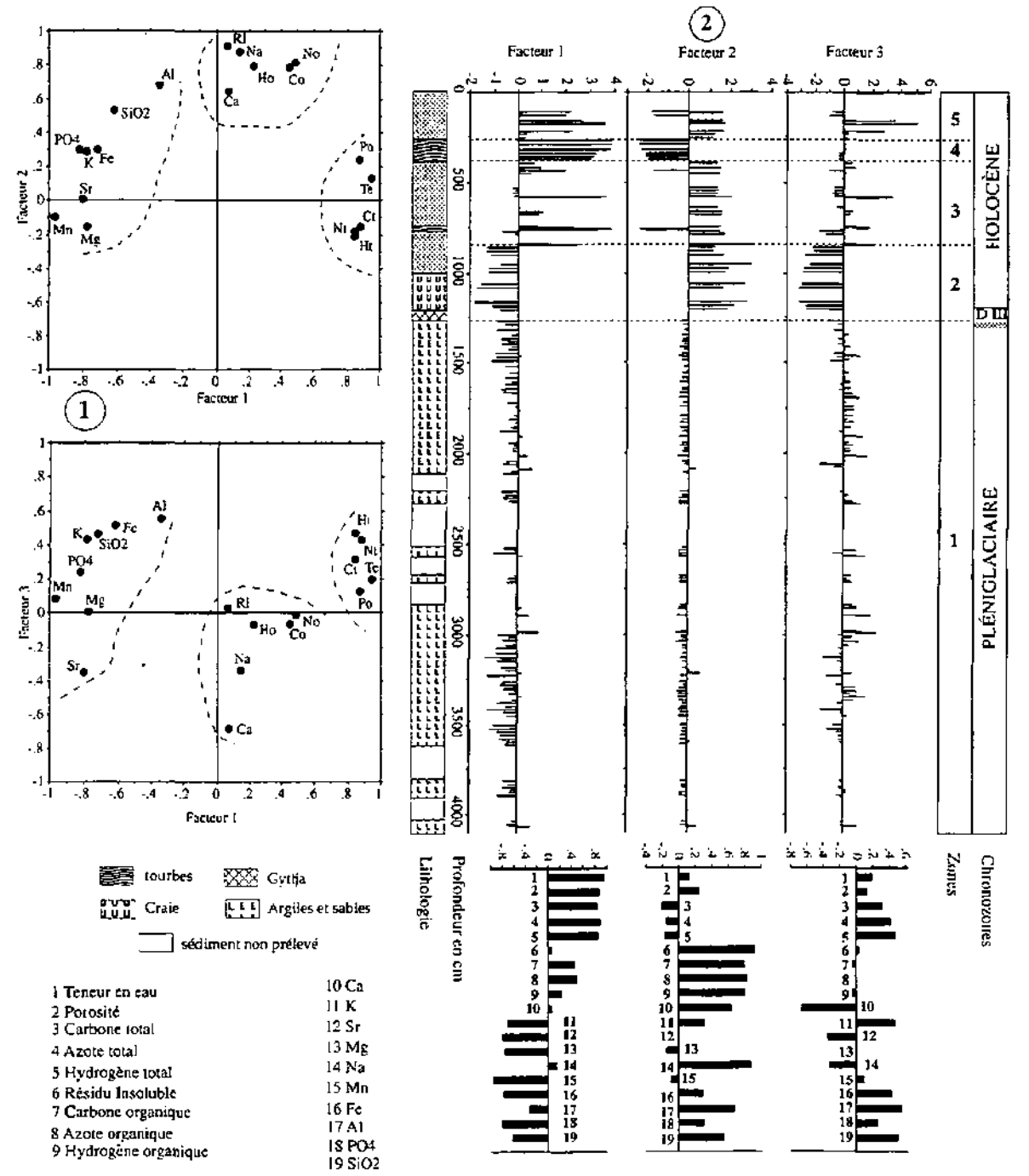


Figure 2.77 : Analyse Factorielle en Composantes Principales réalisée sur les pourcentages des paramètres géochimiques du forage LLC1 du Locle

Composition chimique

- Les gyttjas se différencient des craies organiques par un taux de calcium (qui peut être plus élevé) et par des pourcentages en Si, Al, K Fe et PO_4 qui sont plus faibles que dans les craies lacustres organiques.

1.2.5. Analyse Factorielle en Composantes Principales des données de la géochimie

La figure 2.77 montre les résultats de l'Analyse Factorielle en Composantes Principales (ACP) réalisée sur les pourcentages de tous les paramètres mesurés sur les sédiments du forage LLC1. Les cartes factorielles (en 1) montrent les liaisons existant entre les différentes variables. Dans les deux cas, trois groupes sont observés :

- le premier groupe est formé par la teneur en eau et la porosité qui sont toujours accompagnées du CHN total ;

- le second groupe comprend le résidu insoluble, le CHN organique, le calcium et le sodium ;

- le troisième groupe est constitué par tous les autres éléments.

La distribution des contributions des échantillons (en 2, figure 2.77), en fonction de la profondeur, permet d'individualiser 5 zones. La zone inférieure (zone 1) correspond aux argiles silteuses grises. La limite de contribution entre la zone 1 et la zone 2 est très nette sur les facteurs 2 et 3, mais pas sur le facteur 1. C'est sur ce dernier que l'on peut placer précisément la limite entre la zone 2 et la zone 3 qui correspond sédimentologiquement au passage entre les craies et les gyttjas. Les tourbes correspondent à la zone 4 ; elles se distinguent des gyttjas par des contributions plus élevées. Cette figure montre très bien que toutes les variables qui sont plus ou moins liées à la présence de matière organique (n° 1 à 9) permettent de différencier objectivement les tourbes. De la même façon, les niveaux de craie lacustre sont très bien repérés en raison du poids des variables "calcium", "strontium" et "sodium".

La figure 2.78 montre la distribution des contributions de chaque échantillon pour des sélections de quelques variables. Cette analyse permet également de différencier les craies lacustres (zone 5) des argiles (zones 1 à 4) et des gyttjas (zone 6). Les tourbes, entre 3 et 4 m, n'ont pas été analysées mais les quelques échantillons, dans les gyttjas, montrent des contributions très variables dont les plus fortes correspondent à des niveaux proche de tourbes.

Le traitement des pourcentages des cations et anions donne la possibilité de séparer les argiles silteuses grises qui apparaissaient homogènes sur la figure 2.77. Deux limites de contribution sont très bien marquées : l'une à 30 m, l'autre à 20 m de profondeur, pour les trois facteurs scores, séparant ainsi les zones 1 et 2 et les zones 3 et 4. La limite entre la zone 2 et la zone 3 n'est pas aussi visible. La contribution des variables permet d'apprécier leur poids dans la distinction de ces zones.

La figure 2.79 confirme la zonation du forage LLC1-2 à 5 qui a été décrite plus haut. L'Analyse Factorielle en Composantes Principales a été réalisée en trois étapes distinctes. La

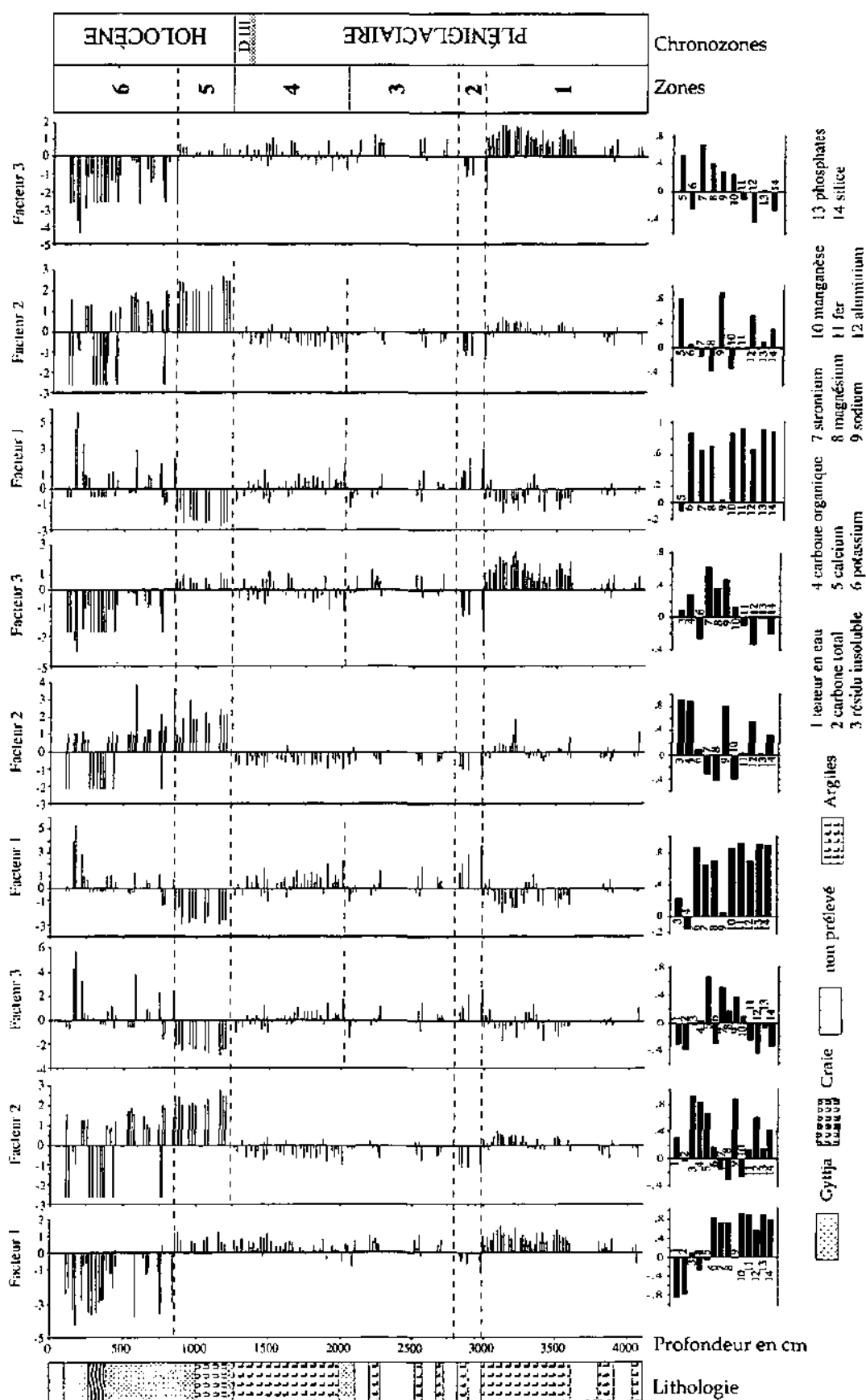


Figure 2.78 : Analyse Factorielle en Composantes Principales sur les pourcentages des paramètres mesurés sur le forage LLC 1

Composition chimique

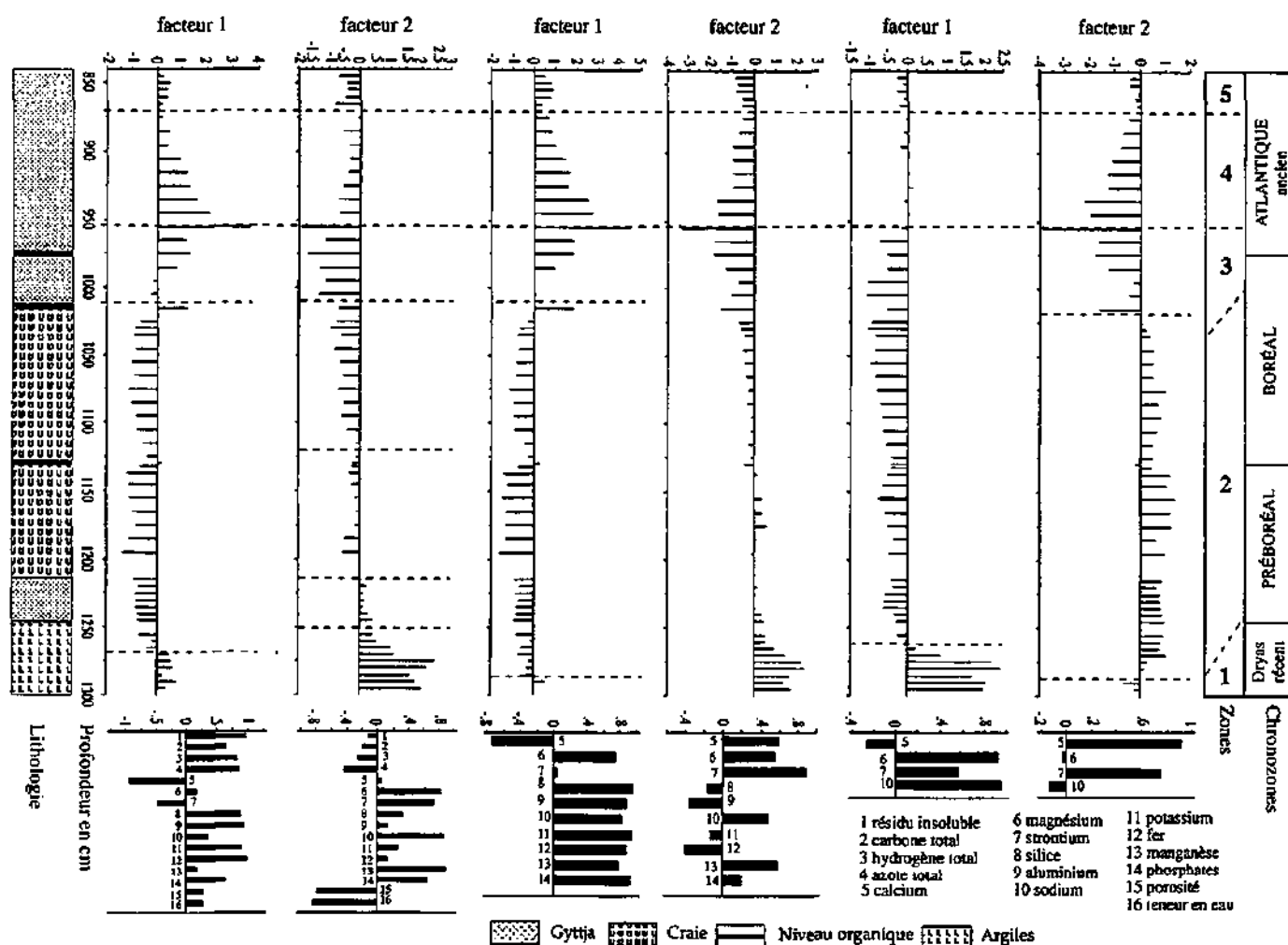


Figure 2.79 : Analyse factorielle en Composantes Principales sur les pourcentages des paramètres mesurés dans les forages LLC1-2 à 5

première consiste à analyser tous les paramètres mesurés sur chaque échantillon ; la seconde partie du traitement n'a porté que sur les cations et les anions. La troisième étape de l'analyse a été faite sur la sélection de quelques variables.

Le passage entre les argiles silteuses grises et les craies lacustres n'est pas toujours facilement identifiable à partir du traitement statistique. Ces résultats montrent qu'il s'agit d'un passage progressif d'un faciès à l'autre. De la même manière la limite de contribution entre les zones 2 et 3 montre qu'il y a une transition entre les craies lacustres relativement pures et les craies organiques.

Deux limites de contribution sont très bien identifiées ; l'une entre les zones 3 et 4, l'autre entre les zones 4 et 5. La zone 3 traduit le passage progressif des craies aux craies organiques qui va jusqu'à un niveau de gytja qui se trouve à 950 cm. C'est la contribution de cet échantillon qui marque la limite entre les zones 3 et 4. La zone 4 montre un retour progressif aux craies organiques, puis aux gytjas (zone 5).

1.3. CARACTÉRISATION DES FACIES SÉDIMENTOLOGIQUES

Les figures qui vont suivre ont été conçues sans prendre en compte les pourcentages de calcium. Les différents secteurs correspondent à des valeurs moyennes calculées sur les intervalles de profondeur indiqués en regard des faciès sédimentologiques considérés. Le tableau 2.4 donne les résultats numériques de ces moyennes établies à partir des annexes n° 28, 29 et 30 :

	Ca	Mg	Sr	SiO ₂	Al	Na	K	Fe	Mn	PO ₄
Craies LLC1-2 10.45-11.86 m	37.452	0.304	0.181	0.226	0.014	0.006	0.006	0.090	0.009	0.049
Craies LLC1 10.25-12.38 m	72.748	0.297	0.099	0.050	0.008	0.059	0.002	0.013	0.005	0.005
Gyttjas LL1-3 8.45-9.25 m	33.501	0.370	0.169	0.478	0.078	0.008	0.015	0.152	0.009	0.054
Argiles LLC1-3 12.45-12.8 m	33.105	1.038	0.206	0.721	0.092	0.018	0.021	0.196	0.018	0.090
Argiles LLC1 14-19 m	29.746	1.087	0.155	0.682	0.093	0.028	0.030	0.407	0.023	0.095
Argiles LLC1 23-29 m	30.144	1.699	0.124	0.728	0.131	0.026	0.028	0.457	0.027	0.102
Argiles LLC1 31-34 m	30.536	2.391	0.179	0.713	0.098	0.033	0.023	0.375	0.025	0.088

Tableau 2.4 : Calcul des pourcentages moyens des éléments mesurés dans la phase acido-soluble en fonction des faciès sédimentaires rencontrés dans les forages du Locle

1.3.1. Les argiles silteuses grises

D'une manière générale le sédiment argilo-silteux gris compris entre 41 et 20 m de profondeur contient entre 1 et 2 % de magnésium et 30 % de calcium et des valeurs en

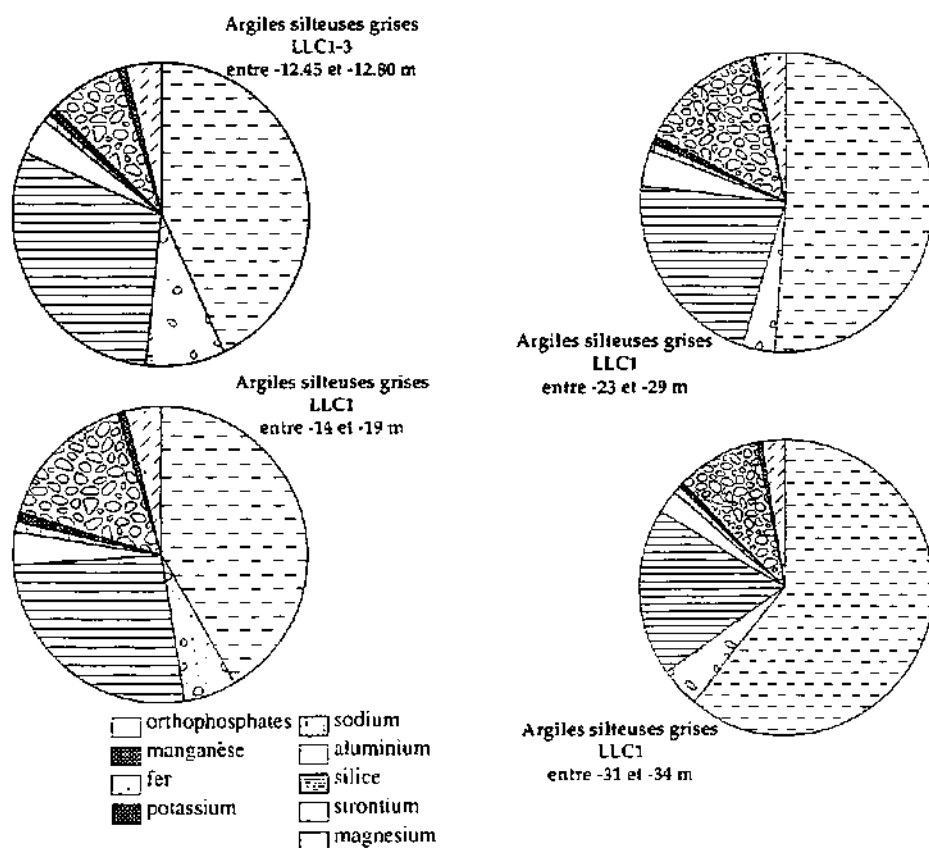


Figure 2.80 : Caractérisation des argiles silteuses par les données de la géochimie

Composition chimique

strontium de l'ordre de 0,10 à 0,20 %. D'autre part, la silice, le fer, l'aluminium, le sodium, le potassium et les phosphates présentent leurs valeurs les plus fortes.

Dans cette homogénéité apparente, trois types d'argiles silteuses grises peuvent être identifiées au Locle figure 2.80.

Le premier type d'argile silteuse se rencontre entre 14 et 19 mètres dans le forage LLC1 et à la base des forages LLC1-2 à 5. Le taux de Mg est très voisin de 1 %. La quantité de silice est légèrement supérieure dans le forage LLC1-2 à 5, le pourcentage de fer et de strontium marque également une différence. Les proportions des autres éléments PO_4 , Mn, K, Na, Al sont comparables.

Le second type se différencie du premier par la variation du taux de Mg. Ce taux dépasse les 1.5 % sur près de six mètres de remplissage (-29, -23 m de profondeur). La quantité de silice et de strontium est légèrement plus faible. Les proportions de tous les autres éléments restent quasiment inchangées par rapport aux sédiments compris entre -19 et -14 mètres.

La troisième famille d'argiles silteuses grises ne se rencontre qu'au delà de 30 mètres de profondeur. La quantité de magnésium contenue dans ces sédiments est relativement importante par rapport aux deux précédentes (environ 2.4 % contre respectivement 1.7 vers -25 m et 1 % vers -15 m). Seuls les taux de fer et de silice paraissent diminuer dans ce type d'argiles.

1.3.2. Les craies lacustres

La caractérisation des craies lacustres pose problème dans le forage LLC1. Les mesures faites sur les forages LLC1-2 à 5 ne sont pas comparables (figure 2.81). Il est possible que les différences proviennent d'une mauvaise décarbonatation des poudres du forage LLC 1. On remarquera que le magnésium constitue plus de 30 % des éléments chimiques contenus principalement dans la calcite. La quantité de strontium n'est pas négligeable puisqu'elle atteint près de 20 % du total présenté ici. L'aluminium, le manganèse, le fer, le potassium et les phosphates ne jouent qu'un rôle secondaire dans ces craies. La silice, le fer et les orthophosphates ont des valeurs très inférieures à celles mesurées dans les forages LLC1-2 à 5 ; par contre, le pourcentage de magnésium est nettement supérieure dans le forage LLC1.

1.3.3. Les gyttjas

La gyttja est un sédiment contenant entre 20 et 35 % de calcium et des teneurs en magnésium et strontium voisines de celles de la craie. Par contre, les taux de silice, d'aluminium et de fer y sont nettement plus élevés. Le taux d'orthophosphates est très peu différent de celui des craies (figure 2.82). Le traitement statistique des données de la chimie a montré que les gyttjas forment des séries de transition entre différents faciès. De fait, leurs compositions chimiques peuvent être très différentes, mais elles montrent toujours des tendances gyttjas-craies organiques ou gyttjas-tourbes.

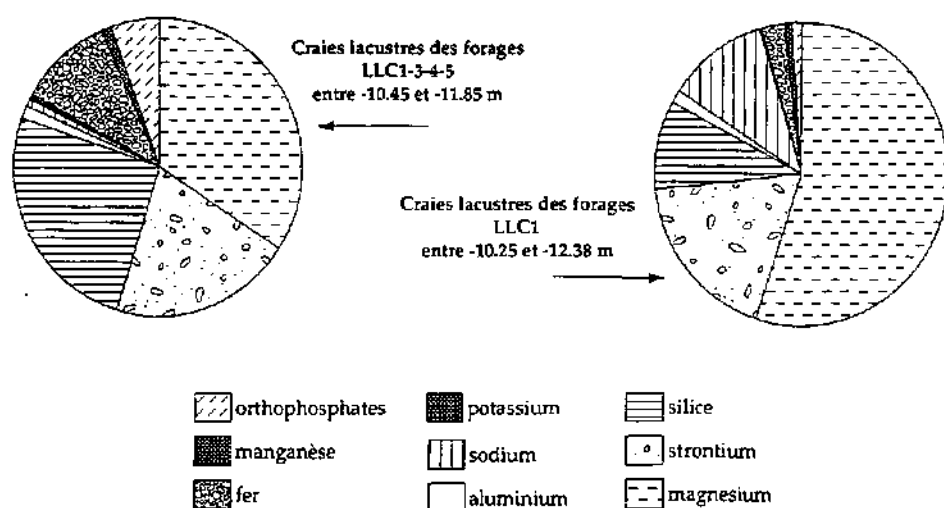


Figure 2.81 : Caractérisation des craies lacustres par les données de la géochimie

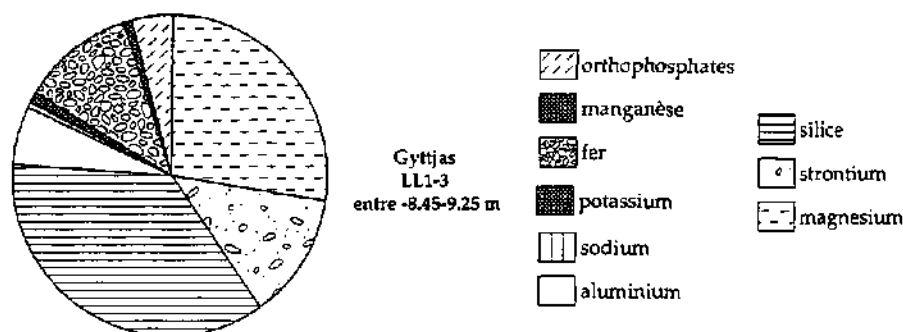


Figure 2.82 : Caractérisation des gyttjas par les données de la géochimie

1.3.4. Les tourbes

Les dépôts de tourbe ont depuis longtemps attiré l'attention, pas seulement pour le combustible et l'intérêt horticole, mais également pour des raisons écologiques et biogéochimiques (Damman, 1978). Il est admis depuis les années trente (Waksman, 1930) que l'étude de la nature des tourbes soulève des problèmes qui sont différents de ceux rencontrés dans l'étude des sédiments indurés ou des sols. La nature organique des tourbes et son origine végétale sont connues depuis longtemps, mais les processus de sa formation sont encore peu élucidés. La composition chimique des tourbes est, selon Waksman (1930), influencée par la nature des associations végétales lui donnant naissance et par la quantité de nutriments contenus dans le milieu dans lequel elles croissent. Depuis, de nombreux auteurs (Climo, 1963, 1965 ; Lähde, 1969 ; Finney *et al.*, 1968 ; Mattson, Koulter-Anderson, 1954, 1955 ; Largin *et al.*, 1972 ; Mitchel, 1954 ; Redfield, 1958 ; Hanselmann, 1986) se sont penchés sur les mécanismes physiques, chimiques et biologiques de la formation, puis de la transformation des tourbes. Les niveaux de tourbes des forages du Locle n'ont pas été analysés dans le détail ; mais les niveaux de gyttja les plus organiques montrent, comme le signalent ces auteurs, l'absence de calcium, des teneurs en silice exceptionnellement élevées (1,5 à 2 %) alors que celles du fer atteignent (1 %) et celles de l'aluminium (0,4 %). Le pourcentage de potassium peut atteindre 0,06 %.

Composition chimique

1.4. ORIGINE DES ÉLÉMENTS

Les pourcentages des paramètres mesurés en géochimie ont été comparés aux pourcentages des minéraux présents dans le forage LLC1. Ce traitement a été possible en raison du nombre important de descripteurs et d'échantillons analysés. (Bouroche, Saporta, 1989 ; Cibois, 1991).

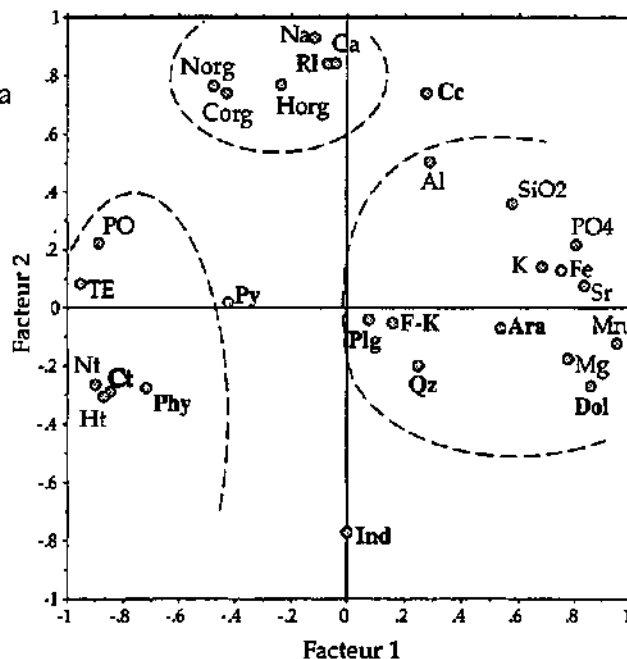
1.4.1. Analyse multivariée des données de la géochimie et de la minéralogie

Figure 2.83 : Reproduction du croisement des deux premiers plans factoriels obtenus en confrontant les données de la géochimie et de la minéralogie

La figure 2.83 donne le résultat de l'Analyse Factorielle en Composantes Principales réalisée sur les pourcentages des minéraux et les pourcentages des paramètres géochimiques des sédiments du forage LLC1 ; le tableau 2.5 constitue la matrice de corrélation issue de ce traitement des données.

Un pôle "détritique" est représenté par le groupe : manganèse, magnésium, dolomite, aragonite, quartz, feldspaths et plagioclases.

Un autre pôle, à dominante détritique également, regroupe le Sr, PO₄, Fe, K, SiO₂ et Al. Il se distingue du premier par sa place sur le plan factoriel, mais reste néanmoins lié au premier pôle. Les coefficients de corrélation entre ces éléments sont supérieurs à 0,7 (tableau 2.5).



Elément	Symbole	Phy	Qz	F-K	Pln	Cc	Dol	Ara	Py	Ind	TE	PO	Cl	Ni	Rt	RE	Corg	Norg	Horg	Ca	K	Sr	Mg	Na	Mn	Fe	Al	PO4	SiO2
Porphyroclastes	Phy	1																											
Quartz	Qz	0.07	1																										
Feldspar-K	F-K	-0.072	0.235	1																									
Plagioclase	Pln	-0.02	0.077	-0.028	1																								
Calcite	Cc	-0.04	-0.17	-0.009	-0.018	1																							
Dolomite	Dol	0.321	0.151	0.036	0.041	-0.018	1																						
Aragonite	Ara	-0.043	0.158	0.146	0.082	0.067	0.476	1																					
Pyrite	Py	0.12	-0.149	-0.056	-0.025	-0.09	-0.13	-0.24	1																				
Indolite	Ind	0.187	0.181	-0.025	-0.014	-0.028	0.266	0.079	-0.024	1																			
Tenacity	TE	0.332	-0.219	-0.148	-0.077	-0.281	-0.17	-0.501	0.334	-0.026	1																		
Porosity	PO	0.37	-0.307	-0.187	-0.129	-0.134	-0.08	-0.522	0.369	-0.149	0.443	1																	
Carbonic acid	Cl	0.29	-0.225	-0.121	-0.045	-0.137	-0.14	-0.127	0.341	0.354	0.24	0.63	1																
Alumina	Al	0.37	-0.102	-0.116	-0.039	-0.007	-0.14	-0.17	0.39	0.31	0.31	0.74	0.93	1															
Hydroxide total	Ht	0.34	-0.067	-0.105	-0.051	-0.038	-0.161	-0.19	0.335	0.376	0.363	0.717	0.948	0.901	1														
Carbonic insoluble	Rt	-0.001	0.009	0.007	-0.023	0.311	-0.291	-0.129	-0.785	-0.4	-0.467	0.151	0.247	-0.148	-0.081	-0.006	1												
Organic anion	Corg	0.116	-0.179	-0.087	-0.042	0.259	-0.487	-0.122	0.164	-0.375	-0.487	0.512	0.274	0.28	0.242	0.79	1												
Organic anion	Norg	0.004	-0.192	-0.107	-0.08	0.272	-0.533	-0.309	0.183	-0.454	-0.551	0.581	0.367	0.313	0.275	0.782	0.941	1											
Hydroxide organic	Horg	0.017	-0.195	-0.054	-0.03	0.37	-0.392	-0.179	0.112	-0.434	-0.302	0.323	0.077	0.032	0.029	0.683	0.718	0.692	1										
Calcium	Ca	-0.118	-0.396	-0.072	-0.029	0.376	-0.396	-0.038	0.018	-0.794	0.043	0.168	-0.297	-0.325	-0.281	0.543	0.49	0.517	0.529	1									
Potassium	K	-0.291	0.16	0.066	0.028	0.004	0.554	0.223	-0.348	0.077	-0.563	-0.408	-0.353	-0.493	-0.463	0.789	0.99	-0.144	-0.123	0.034	0.167	1							
Strontium	Sr	-0.189	-0.11	0.047	0.021	0.387	0.73	0.602	-0.514	-0.027	-0.2	-0.721	-0.674	-0.322	-0.8	-0.112	-0.234	-0.339	-0.125	0.132	0.408	0.718	1						
Magnesium	Mg	-0.14	0.07	0.066	0.104	0.057	0.644	0.344	-0.297	0.193	-0.709	-0.669	-0.51	-0.609	-0.534	-0.233	-0.373	-0.451	-0.278	0.207	0.428	0.652	0.175	1					
Sodium	Na	-0.16	-0.04	-0.03	0.04	0.04	0.64	0.34	-0.297	0.193	-0.709	-0.669	-0.51	-0.609	-0.534	-0.233	-0.373	-0.451	-0.278	0.207	0.428	0.652	0.175	1					
Manganese	Mn	-0.16	-0.04	-0.03	0.04	0.04	0.64	0.34	-0.297	0.193	-0.709	-0.669	-0.51	-0.609	-0.534	-0.233	-0.373	-0.451	-0.278	0.207	0.428	0.652	0.175	1					
Iron	Fe	-0.16	-0.04	-0.03	0.04	0.04	0.64	0.34	-0.297	0.193	-0.709	-0.669	-0.51	-0.609	-0.534	-0.233	-0.373	-0.451	-0.278	0.207	0.428	0.652	0.175	1					
Aluminum	Al	0.028	0.22	0.024	-0.02	0.108	0.113	0.109	-0.095	-0.12	-0.108	-0.16	-0.307	-0.178	-0.171	0.578	0.233	0.344	0.407	0.106	0.62	0.025	0.155	0.376	0.3	0.637	1		
Orthophosphates	PO4	-0.069	0.233	0.169	0.031	0.111	0.123	0.148	-0.291	-0.394	-0.668	-0.607	-0.667	-0.65	-0.628	0.167	-0.177	-0.154	0.005	-0.01	0.732	0.526	0.543	0.028	0.237	0.817	0.626	1	
Silica	SiO2	-0.192	0.398	0.044	-0.034	0.073	0.447	0.134	-0.216	-0.094	-0.394	-0.205	-0.479	-0.402	-0.379	0.431	0.073	0.111	0.226	-0.019	0.311	0.334	0.326	0.238	0.57	0.623	0.89	0.801	1

Tableau 2.5: Matrice de corrélation obtenue lors de l'analyse des données de la géochimie

Ce groupe peut être qualifié de détritique par sa position par rapport aux autres éléments. Ca et Na, avec le C, H, N organique constituent le pôle des éléments endogènes.

Dans une autre mesure, le calcium, le sodium et le résidu insoluble, C org., N org. et H org. forment un pôle distinct de celui constitué par carbone total, azote total et hydrogène total. La porosité et la teneur en eau (très liées) sont en regard de ces groupes.

1.4.2. Discussion

L'antagonisme élément détritique - élément autochtone est de nouveau souligné ici par ces analyses chimiques. Le calcium et le sodium (mais également le résidu insoluble et le C, H, N organiques) sont très bien corrélés ; ils s'opposent au strontium, magnésium, manganèse, orthophosphates, fer et potassium.

Le magnésium

Le magnésium est un élément alcalino-terreux plus petit que le calcium. Son rayon ionique n'est que de 0.66 Å, il est hexacoordonné. Il est l'un des constituants principaux des minéraux ferromagnésiens. La dolomite, si elle est présente, est la source majeure de magnésium. La biotite peut par ailleurs être fournisseur de cet ion (Robertson, 1991).

Le magnésium provient donc en grande partie de la dolomite, minéral provenant des formations du substratum du paléolac (Kübler, 1962 a et b)(partie 2, chapitre 3). Une certaine proportion de cet élément vient de la structure cristalline de la calcite. Les dosages effectués sur les craies montrent un pourcentage constant en magnésium voisin de 0.2-0.3 %. Une autre partie du magnésium provient de la dolomite. Le taux de Mg dépasse rapidement 1 % dès que la dolomite est identifiée dans le sédiment (argiles silteuses grises par exemple). Les minéraux argileux, comme les chlorites ferro-magnésiennes, sont également une source de cet élément. La matière organique en voie de transformation, peut libérer une certaine quantité de magnésium qui entraine, en partie, dans la composition de la chlorophylle.

Le calcium

Le calcium comme les autres alcalino-terreux peut se retrouver en solution dans de nombreux composés comme les carbonates, les fluorures, les hydroxydes et les phosphates. Son rayon ionique est de 0.99 Å et son octacoordination lui donne la possibilité d'entrer dans la structure des tectosilicates, il peut donner des structures stables avec la plupart des minéraux ferromagnésiens (exemple : les amphiboles) et non ferromagnésiens. La source la plus importante de calcium reste la calcite, la dolomite et les plagioclases basiques dans tous les bassins sédimentaires (Robertson, 1991).

Le calcium, le magnésium et le sodium entrent dans la constitution de la maille cristalline de la calcite. Le sodium, en quantité moindre, participe à la substitution du calcium par le magnésium. Toutefois, la substitution par le sodium dans le réseau cristallin de la calcite pourrait être favorisée par sa taille (rayon ionique) et sa charge (+) par opposition au magnésium qui possède un rayon ionique plus petit et deux charges positives (Robertson, 1991). D'autres éléments peuvent se rencontrer à l'état de traces dans ces structures cristallines.

Composition chimique

La calcite authigénique naît donc de la remobilisation du calcium issu de l'altération des formations carbonatées du bassin versant du lac quaternaire.

Le strontium

Au Locle, le taux de strontium n'est visiblement pas lié à la quantité de calcite. La source de strontium la plus importante, dans les remplissages lacustres, est la dissolution des roches carbonatées et sulfatées (Brass, 1976 ; Zeroual, 1995). Lorsque les conditions physico-chimiques de précipitation des carbonates sont réunies, le strontium peut se substituer au calcium dans la maille de l'aragonite.

Kübler (1962) a mesuré des teneurs en Sr de l'ordre de 2 % dans les sédiments oehningiens. La strontianite est l'expression minérale non détectable de cet élément. Rolli et Ruch (1994) ont mis en évidence une "anomalie" de strontium dans deux lacs suisses : le Loclat et le Gerzensee. Une très nette augmentation du rapport de Sr/Ca centrée sur le Bølling et l'Allerød et non sur le post-glaciaire (Zeroual, 1995) fait figure d'une dissemblance aux yeux de Rolli et Ruch (1994). Une telle irrégularité n'a pas été observée par ailleurs dans d'autres lacs : Neuchâtel (Schwalb, 1992), Zürich (Finger *et al.*, 1984). Au Locle, le changement de sédimentation correspondant avec la précipitation des carbonates autochtones ne coïncide pas avec l'apparition d'une telle anomalie. Les valeurs enregistrées au Locle sont de l'ordre de 0.188 % au maximum ; ces valeurs sont comparables à celles de la littérature (0.2% au Gerzensee, Neuchâtel, Loclat contre 0.4%, par exemple dans le lac Isli au Maroc).

Le sodium et le potassium

Ces deux éléments font partie du groupe des métaux alcalins. Le sodium a un rayon ionique de 0.98 Å, il est très soluble à cause de sa taille et de sa monovalence. Le potassium possède un rayon ionique encore plus important (1.33 Å) ; sa coordination est toujours élevée (8 ou 12). A la différence du sodium, le potassium est moins soluble dans l'eau. La source potentielle de sodium et de potassium est les feldspaths potassiques et calcosodiques. Au Locle, quand les pourcentages des minéraux détritiques diminuent, les taux de Na et de K diminuent ; ces taux augmentent quand la quantité de minéraux détritiques est plus importante. Dans les craies lacustres la teneur de ces éléments est faible et stable. Dans les craies organiques et les gyttjas, leurs teneurs augmentent quand les pourcentages de phyllosilicates sont plus élevés. La teneur en potassium y est toutefois plus importante que celle du sodium. Les tourbes (matière organique autochtone) peuvent être très riches en PO_4 , Na, K, Mg, Mn et Fe (Damann, 1978). Les concentrations de ces éléments diminuent fortement lorsque les sédiments sont soumis à des lessivages causés par des variations de nappes phréatiques.

La silice

La silice, élément métalloïde ayant des propriétés de métaux et des propriétés propres aux non métaux, peut avoir trois origines distinctes. La première source de silice provient de l'altération des minéraux silicatés ; le quartz possédant une solubilité quasiment nulle ne peut être considéré comme une source majeure de cet élément. La seconde source est

l'activité biologique. En minéralogie, nous avons vu que les diatomées, les carex et les prêles concentrent la silice dans la structure des tissus foliaires (Clymo, 1963, 1965 ; Cannon *et al.*, 1968 ; Cameron, 1970, 1975 ; Damman, 1978 ; Shacklette, 1965 a et b ; Shacklette, Connor, 1973). Enfin, la silice peut précipiter sous forme amorphe. Au Locle, la silice peut avoir toutes ces origines mais plus vraisemblablement une origine détritique et biologique.

Le résidu insoluble

Le résidu insoluble correspond donc à tout ce qui n'a pas été mis en solution par HCl à chaud. La nature de ce résidu peut différer d'un faciès sédimentaire à un autre. Le résidu insoluble peut provenir des silico-clastiques, des sulfures, des sulfates, des phosphates et de la matière organique. Dans les sédiments du Locle l'essentiel du résidu insoluble n'est pas exclusivement de nature minérale, comme dans le Lac Isli (Zeroual, 1995), il est également de nature organique. Toutefois pour cet auteur, le résidu insoluble est inversement proportionnel au carbone total. La présence de résidu insoluble croît quand le taux de matière organique ou de minéraux détritiques augmente et que la quantité de calcite diminue. Les minéraux argileux sont ici les grands producteurs d'Al, K, Fe, Mn. L'analyse minéralogique des résidus insolubles de plusieurs échantillons montre la présence de micas, de kaolinite, d'interstratifiés et de minéraux en grains. Ces minéraux argileux peuvent libérer, sous l'action de HCl, une partie des ions qu'ils retenaient. Par exemple, les smectites ont un pouvoir d'échange ionique important ; elles peuvent retenir par adsorption de nombreux cations. Les cations multivalents sont incorporés préférentiellement en raison de leurs charges quand leurs concentrations dans les fluides interstitiels sont faibles. L'absence d'échanges ioniques dans les bassins lacustres peut être liée à la composition et à la nature des sols et à la présence de smectites dans ces sols (Robertson, 1991). Ca^{2+} est souvent concentré dans les feuillets de ces minéraux argileux en raison de sa bivalence au détriment de Na^+ et K^+ (Robertson, 1991). Mg, Mn, Na et K seront admis dans les structures minérales ultérieurement. Colman, (1982) a déterminé la mobilité relative de plusieurs éléments dans les échanges entre les minéraux et les fluides interstitiels : le calcium est le plus mobile ($\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{Al} > \text{K} > \text{Fe}$).

Les tourbes

L'étude de Damann (1978) porte sur 12 éléments analysés contenus dans une tourbe dans des conditions de drainage. Les éléments Na, K, Mg, N et Ca sont surtout retenus dans les niveaux tourbeux en état de décomposition avancée avec des concentrations voisines, voire supérieures, de celles des niveaux tourbeux de la surface. Les éléments Al, Fe, Mn, Pb et Zn ont un comportement différent ; ils sont abondants dans les couches supérieures (tourbes fibreuses non décomposées). Leurs teneurs décroissent dans la tourbe décomposée (Durig *et al.*, 1988) suite à la transformation de la tourbe et du lessivage. Les sphaignes contiennent plus de K et de N que l'eau des apports par précipitation et les ruissellements. *Sphagnum* (les sphaignes) n'absorbe que 11 % de Na, 28 % de Ca et 56 % du Mg venant de ces apports. Le sodium est très rapidement relargué alors que Mg est stocké ; il semble que la plupart des éléments sont retenus dans les capitules des sphaignes jusqu'au moment de la décomposition de ceux-ci.

Composition chimique

La matière organique

Il est surprenant de remarquer l'opposition N total/N organique. Ce paramètre, comme H_t et H_{org} , reflète essentiellement la présence de matière organique dans le sédiment. La porosité et la teneur en eau sont liées à la quantité de matière organique ; dans les gyttjas et les tourbes on observe une hausse de ces deux paramètres. La teneur en eau mesurée correspond à l'eau interstitielle. La température de déshydratation des sédiments n'était pas suffisamment élevée pour extraire les molécules d'eau présentes entre les feuillets des argiles, ou encore dans les hydroxydes par exemple. Mais la corrélation existant entre la teneur en eau et la porosité est artificielle puisque la porosité est calculée à partir de la teneur en eau.

1.5. SYNTHÈSE : LES APPORTS DE LA GÉOCHIMIE AU LOCLE

Les résultats des analyses géochimiques réalisées sur les sédiments des forages du Locle corroborent le schéma d'évolution minéralogique décrit au chapitre précédent. La distribution verticale de la composition chimique montre un passage très net, sans transition dans le forage LLC1, entre le Tardiglaciaire et l'Holocène. Ce passage apparaît en réalité, d'après le forage LLC1-2, progressif comme le montre la minéralogie.

La sédimentation détritique, correspondant aux argiles silteuses grises, est dominée par les éléments liés aux silico-clastiques (Mg, Si, Fe, Al, Na, K) et également PO_4 .

A l'inverse, la sédimentation carbonatée authigénique montre la quasi absence des éléments cités ci-dessus au profit du calcium alors que le magnésium reste présent avec le sodium en faibles quantités.

Progressivement, la sédimentation carbonatée authigénique devient organique gardant des caractères des craies lacustres et en acquérant des éléments qui étaient présents dans les argiles de la base du forage. Cependant, les taux de Mg et de Sr sont plus faibles que dans les argiles silteuses, mais les taux de Fe, Al, Na, K et PO_4 peuvent être aussi élevés que dans ces argiles détritiques. La minéralogie a permis de montrer, au cours de l'Holocène, des retours ponctuels plus ou moins marqués du détritisme. Ils se traduisent ici par la présence de ces éléments en partie liés aux silico-clastiques, aux apports minéraux éoliens et à la matière organique autochtone.

2. LE FORAGE DU LAC D'ILAY

2.1. LES ANALYSES ÉLÉMENTAIRES DU SÉDIMENT TOTAL

Le forage peut être scindé en quatre parties. La première correspond aux craies lacustres inférieures comprises entre 170 et 62 cm (zone 1, figure 2.84 ; annexe n° 48). La teneur moyenne en eau du sédiment est de 60 % ; la porosité varie peu (80 %). Le taux de résidu insoluble est stable (4.5 %) de même que ceux du CHN total et du CHN organique le sont également.

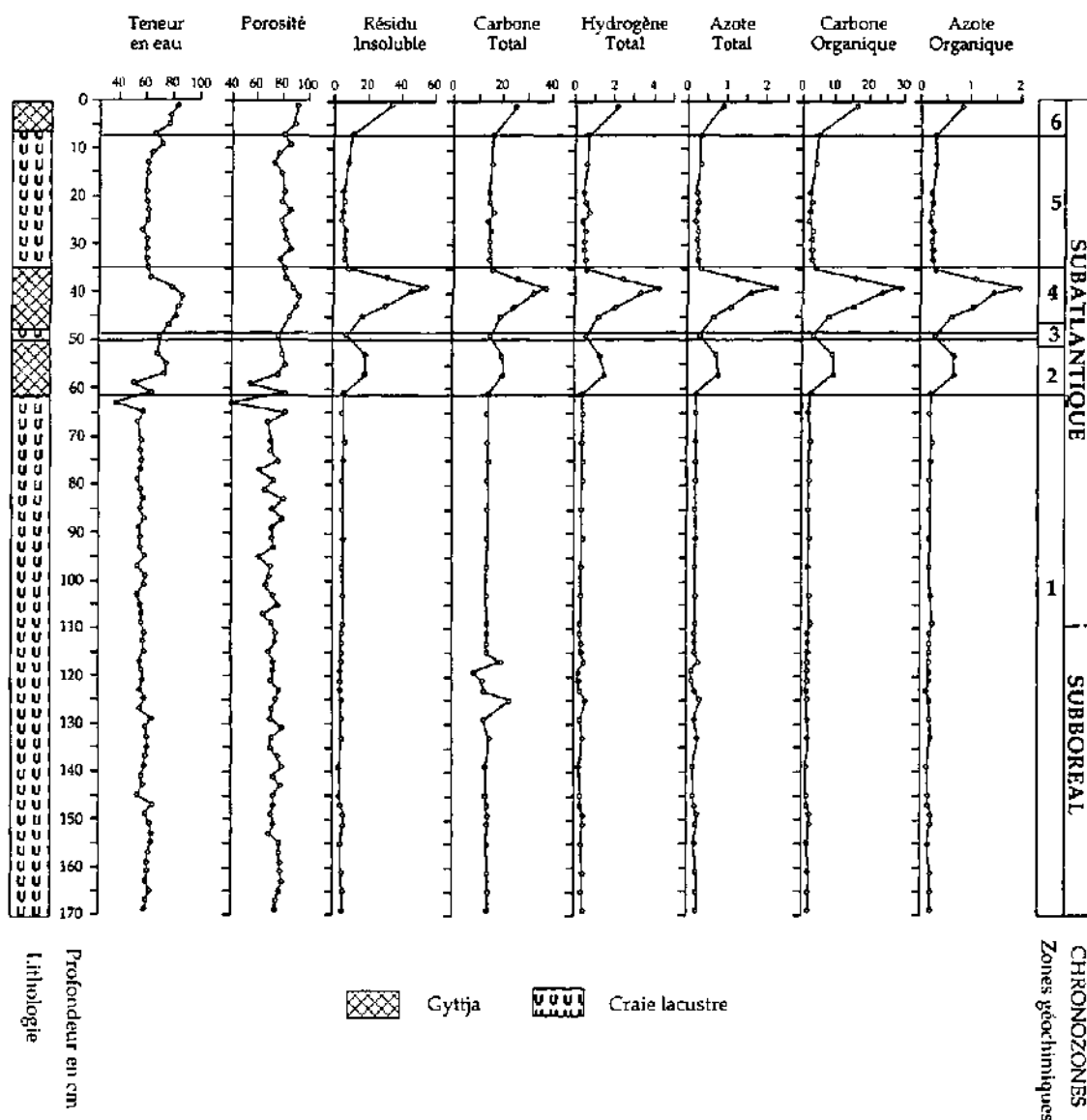


Figure 2.84 : Mesures de la teneur en eau, de la porosité, du Carbone de l'hydrogène et de l'azote dans les sédiments du forage d'Ilay (Profil synthétique)

La seconde partie du forage correspond à deux niveaux de gytja séparés par un niveau de craie lacustre à 50 cm. Le premier niveau de gytja, compris entre 60 et 50 cm (zone 2), montre une teneur en eau et une porosité croissant de manière irrégulière. Les pourcentages de RI, de CHN total et organique augmentent de façon moins marquée. L'intercalation crayeuse (zone 3) permet de voir une diminution de tous les paramètres. Le deuxième niveau de gytja, entre 48 et 35 cm (zone 4), est caractérisé par une hausse beaucoup plus importante du RI, du CHN total et organique jusqu'à un maximum situé à 40 cm, ensuite toutes les valeurs diminuent.

La troisième partie correspond à la craie lacustre supérieure (entre 35 et 7 cm, zone 5), les valeurs de teneur en eau, de porosité et des autres paramètres sont les mêmes que dans la première partie du forage.

Le forage d'Ilay, se termine par des gytjas dans lesquelles on retrouve des valeurs croissantes (zone 6).

Composition chimique

2.2. LA SPÉCIATION DES CARBONATES

Dix éléments majeurs ont été recherchés et dosés dans la fraction solubilisée par HCl ; les éléments chimiques sont les mêmes que ceux qui ont été dosés dans les forages du Locle. Les techniques et les méthodes de mesure sont décrites au chapitre 2 de la première partie. La variation des pourcentages des éléments en fonction de la profondeur permet de différencier 7 zones géochimiques sur la figure 2.85 (les données brutes sont en annexe n° 48 et les descriptions des zones sont en annexe n° 49).

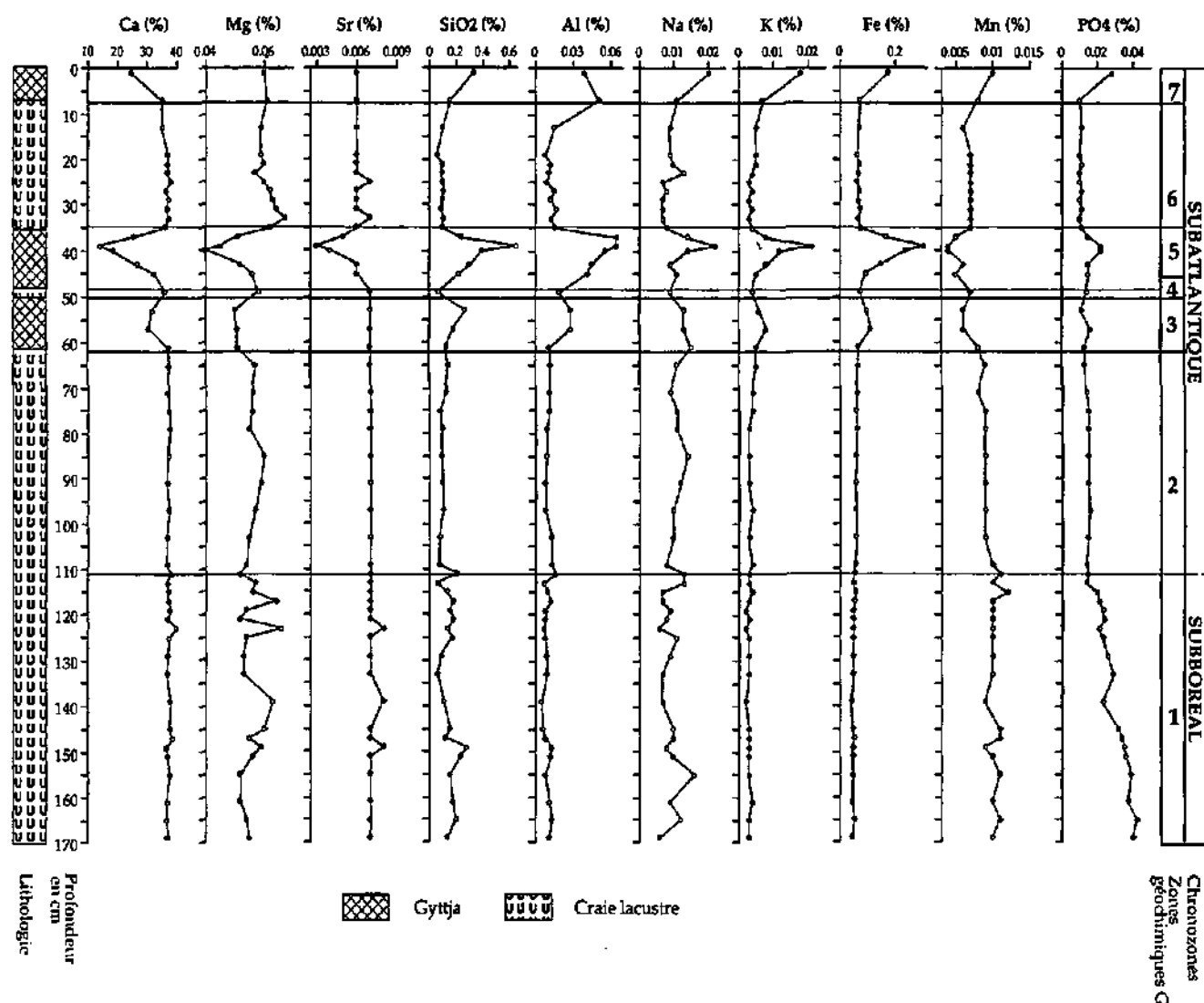


Figure 2.85 : Mesures des éléments de la phase acido-soluble (en pourcentages) des sédiments du forage d'Ilay

2.3. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES DU FORAGE D'ILAY

L'Analyse Factorielle en Composantes Principales sur les pourcentages des paramètres mesurés dans les sédiments du forage d'Ilay s'est déroulée en plusieurs étapes qui sont reportées sur la figure 2.86. Dans chaque cas, la contribution des échantillons a été représentée en fonction de la profondeur. La contribution des variables a également été représentée sous chaque graphique de contribution des échantillons.

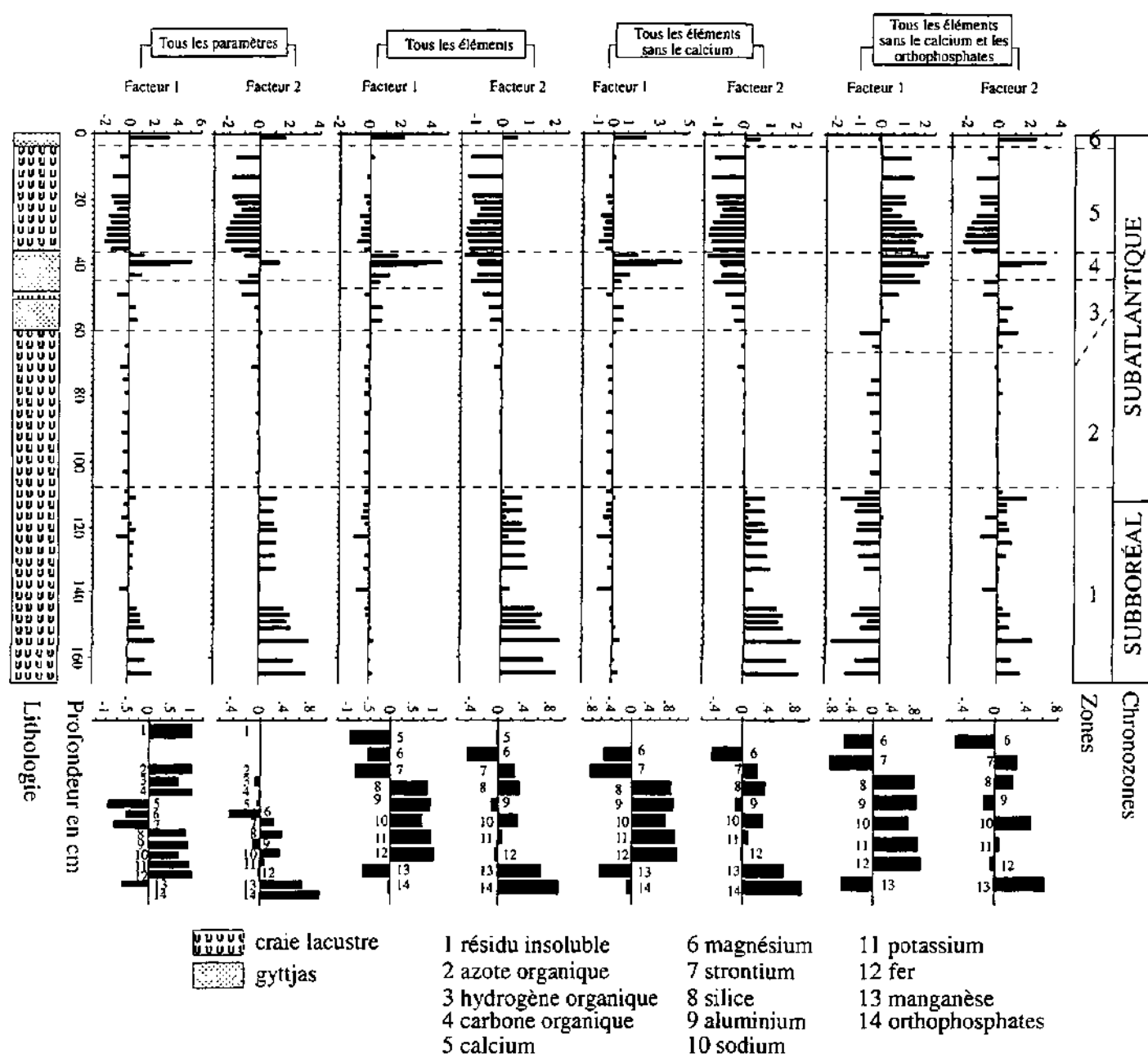


Figure 2.86 : Analyses factorielles en Composantes Principales des données de la géochimie du forage d'Illay

Ce traitement permet d'identifier 6 zones de contribution des échantillons qui correspondent aux zones géochimiques que nous avons décrites ci-dessus. Les contributions des zones 1 et 2 montrent bien que la composition chimique de la séquence de craie lacustre inférieure varie. Les contributions de ces zones sont également très différentes de celles de la zone 5. Il apparaît donc une différence entre les craies lacustres inférieures et les craies lacustres supérieures. On remarque également que les échantillons du premier niveau de gyttja (zone 3) donnent des contributions croissantes du début à la fin de la zone 3. Ces sédiments constituent donc une transition entre les craies et les gyttjas. Cette zone 3 correspond plus vraisemblablement à de la craie organique. En revanche, la zone 4 et la zone 6, correspondant respectivement au deuxième niveau de gyttja et à la gyttja terminale, montrent bien des contributions totalement opposées à celles des craies des zones 1, 2 et 3. La zone 5, qui correspond aux craies lacustres supérieures, est très différente des zones 1 et 2, mais elle est (d'après les traitements statistiques) plus proche des craies organiques de la

Composition chimique

zone 3. La zonation mathématique confirme donc objectivement les zones géochimiques décrites précédemment.

2.4. LES ISOTOPES STABLES DE L'OXYGÈNE ($\delta^{18}\text{O}$) ET DU CARBONE ($\delta^{13}\text{C}$),

La stratigraphie des isotopes stables de l'oxygène, dans les sédiments lacustres, peut être utilisée comme un bon marqueur pour l'évaluation des changements de température, de la paléohydrologie et de l'évaporation. L'absence de détritisme a permis l'utilisation des carbonates inorganiques ; des contrôles ont cependant été réalisés sur les tests calcitiques d'organismes ayant vécu dans le lac. Les valeurs isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ montrent de nombreuses variations dans tout le forage. Si peu de difficultés ont été rencontrées pour synchroniser les carottes à partir de la palynologie, les données isotopiques ont révélé, au contraire, certains problèmes qui ont été résolus en lissant les données avec une moyenne flottante à 3 points.

La composition isotopique du sédiment total a été comparée à celle de spécimens de gastéropodes (*Bithynia tentaculata* (L.)) entre 0 et 50 cm, figure 2.87. Le pic très négatif à - 42 cm dans la gyttja n'a pas d'équivalence au niveau des valeurs isotopiques faites sur les tests des gastéropodes. Les valeurs des $\delta^{18}\text{O}$ des gastéropodes sont moins négatives que celles qui ont été faites sur les carbonates du sédiment total (craie). Les valeurs isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ sont, en revanche, plus basses que celles du sédiment total. Les variations du $\delta^{13}\text{C}$ varient de manière opposée à celles du carbone organique. Cette corrélation n'est pas liée à la variation de la production primaire planctonique comme cela est observé dans d'autres lacs (Stuiver, 1970 ; Eicher, Siegenthaler, 1976, 1983 ; Siegenthaler, Eicher, 1986 ; Lister, 1988 a, b ; Mc Kenzie, Aristegui, 1995 ; Filippi, 1996...), mais à la matière organique palustre (Kübler, com. orale).

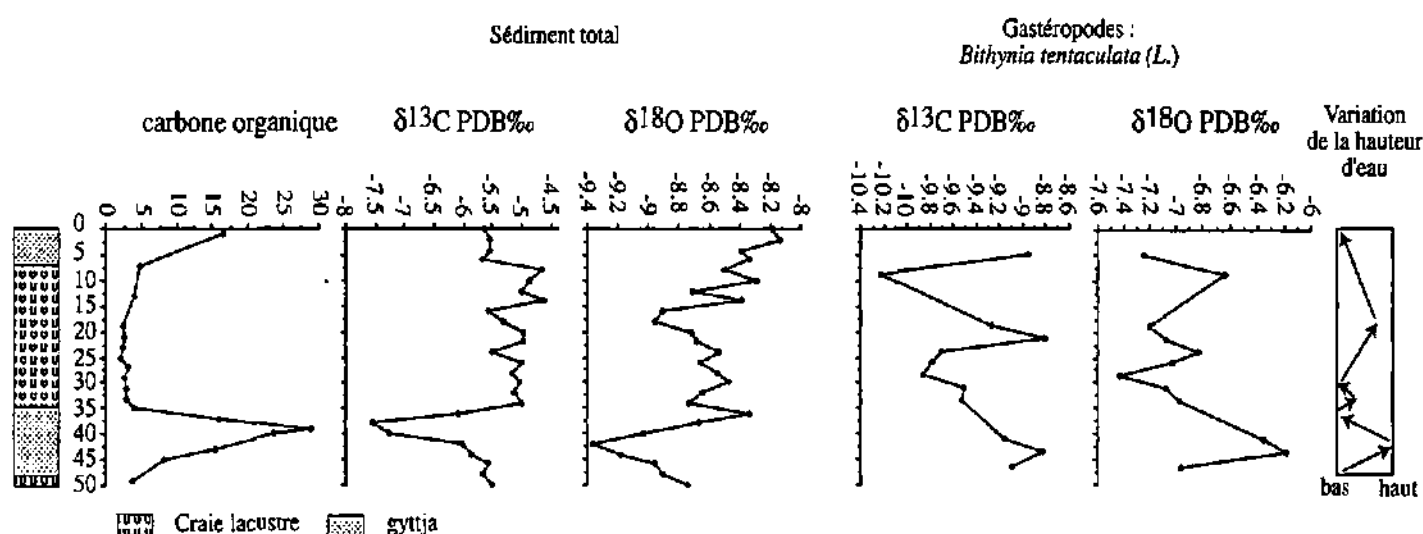


Figure 2.87 : Comparaison des analyses isotopiques faites sur le sédiment total et sur les gastéropodes du forage d'Ilay

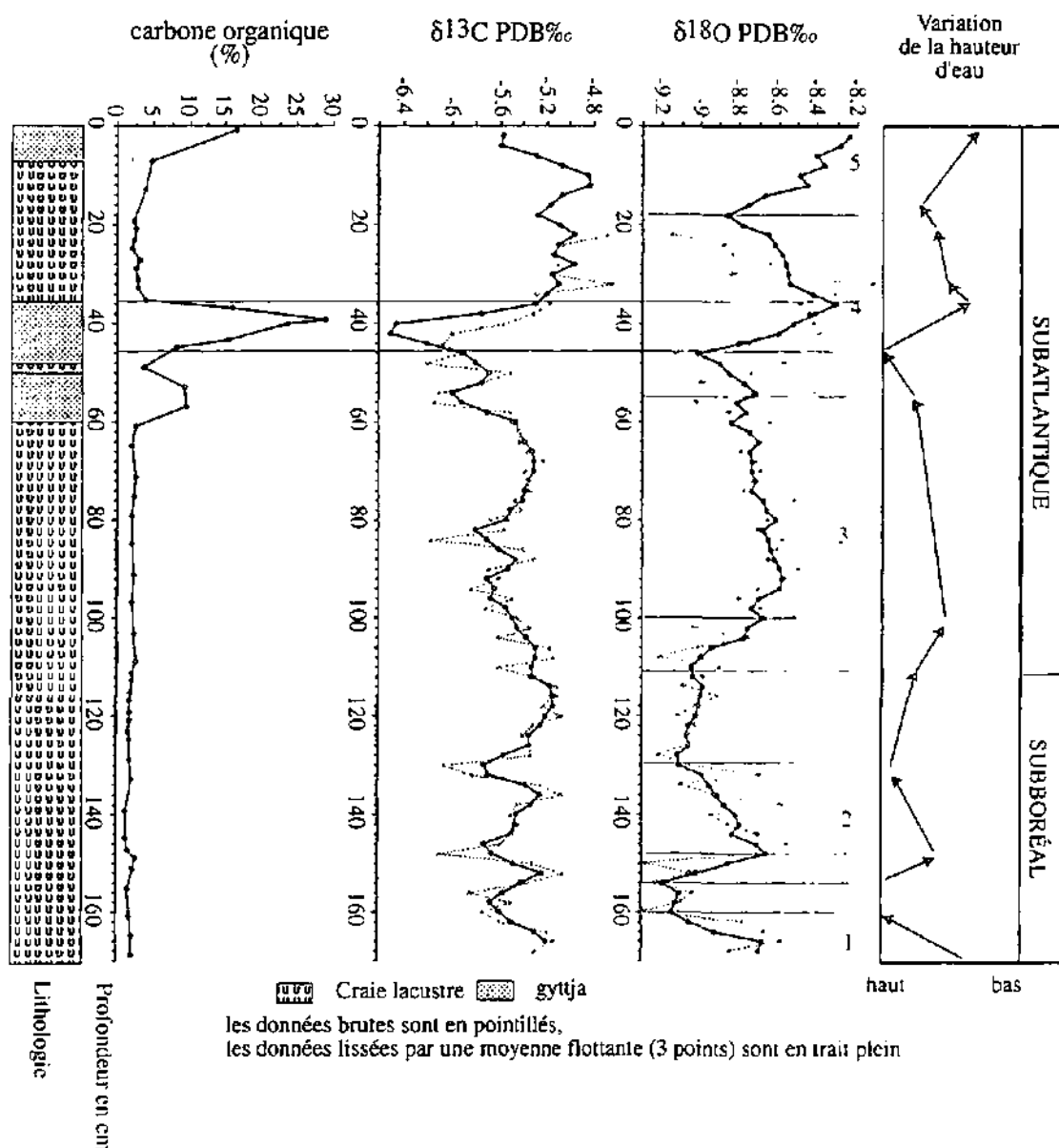


Figure 2.88 : Analyses isotopiques faites sur le sédiment total des forages d'Illay : essai de synchronisation et lissage des données avec une moyenne flottante

La figure 2.88 présente la stratigraphie des isotopes de l'oxygène et du carbone du sédiment total. On observe 5 zones où les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ sont supérieures à -8.8‰ . Ces zones sont séparées par des intervalles où les $\delta^{18}\text{O}$ sont plus négatifs (-9.2‰). Les variations du $\delta^{18}\text{O}$ ne se corrélaient avec aucune variable.

L'enregistrement isotopique du $\delta^{13}\text{C}$ varie autour de -5.4‰ entre -170 et -60 cm, dans la craie lacustre. Des valeurs particulièrement négatives de $\delta^{13}\text{C}$ (-6.5‰) sont enregistrées à -46 cm, dans la gyttja. Le $\delta^{13}\text{C}$ augmente ensuite brusquement de 1.5‰ dans les craies supérieures. Le $\delta^{13}\text{C}$ diminue de nouveau au sommet de la carotte (-5.6‰), dans la gyttja terminale. Il faut noter que le coefficient de corrélation entre les valeurs isotopiques du carbone et de l'oxygène est particulièrement bas ($R = 0.03$). Les variations isotopiques de $\delta^{18}\text{O}$ ont pu donner lieu à une reconstitution paléohydrologique. Les tendances négatives des $\delta^{18}\text{O}$ sont généralement interprétées comme des refroidissements du climat, mais elles peuvent également traduire une diminution de la composition isotopique des pluies sans rapport avec la température

Composition chimique

moyenne. Il peut s'agir également d'une augmentation de la température des eaux du lac selon la loi du coefficient de partition ; dans ce cas l'évaporation alourdirait la composition isotopique, mais, si le niveau des eaux augmente suite à des précipitations accrues et des températures plus faibles, les $\delta^{18}\text{O}$ diminuent en raison d'une évaporation plus faible. Une diminution des $\delta^{18}\text{O}$ correspond à une augmentation du niveau des eaux alors qu'une hausse des $\delta^{18}\text{O}$ correspond à une baisse du niveau de l'eau. A l'intérieur même des craies lacustres, il est possible de percevoir une succession de hauts et de bas niveaux des eaux du lac qui sont symbolisés par des flèches sur les figure 2.87 et 2.88. Il est également possible de suivre des tendances régressives et transgressives à l'intérieur des gyttjas qui est un faciès lacustre de bas niveau.

2.5. LES APPORTS DE LA GÉOCHIMIE À ILAY

Les analyses géochimiques des sédiments d'Ilay permettent de montrer une variation de la composition des craies lacustres de la base du forage. Elles confirment les observations faites en minéralogie de la "roche totale". Les craies lacustres contiennent 60 % d'eau pour un taux de matière organique de 5 %. Les teneurs en silice, magnésium, sodium manganèse et phosphates sont plus élevées dans la partie inférieure du forage correspondant à la fin du Subboréal. Les craies comprises entre 110 et 60 cm, de même que celles entre 35 et 7 cm, ne montrent pas de telles variations.

Les analyses chimiques des niveaux de gyttja soulignent, comme la minéralogie, la complexité de ce faciès sédimentaire. Ces gyttjas contiennent au maximum 30 % de matière organique et 80% d'eau. Les pourcentages des éléments peuvent varier très rapidement à l'intérieur de ce faciès. Le taux de strontium, identique à celui des craies lacustres, est constant dans la gyttja terminale alors qu'il montrent une diminution suivie d'une hausse toute aussi brusque dans la gyttja entre 48 et 35 cm. En revanche, la gyttja comprise entre 60 et 50 cm à une composition identique à la gyttja terminale. En fait, ces deux niveaux de gyttja correspondent chimiquement à des craies lacustres organiques ; un seul niveau, vers 40 cm, correspond non plus à une gyttja mais à un niveau tourbeux.

Les analyses isotopiques de ce forage permettent de montrer le lien étroit qui existe entre le carbone organique d'origine palustre et le $\delta^{13}\text{C}$ contrairement à ce qui est observé dans d'autres lacs (le $\delta^{13}\text{C}$ est en général lié à la production primaire planctonique). D'autre part, la stratification des $\delta^{18}\text{O}$ aboutit à une reconstitution paléohydrologique.

2.6. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

2.6.1. Physico-chimie des eaux et des sédiments actuels

L'étude physico-chimique des eaux actuelles du lac d'Ilay (SRAE 1986) révèle que :

- le fer est présent à l'état de traces dans la colonne d'eau (le fer dissous est plus concentré à proximité du fond en fin de stratification estivale alors que les teneurs en oxygène diminuent) ; les phénomènes de relargage à partir des sédiments paraissent moins

accentués que dans les lacs voisins (SRAE, 1985, 1986) ; le lac d'Ilay, comme ses voisins (Lacs de Maclu), possède actuellement un faible pouvoir réducteur ;

- la teneur en silice est peu importante ; elle est en accord avec les formations géologiques environnantes (la silice solubilisée dans ce lac doit probablement être un facteur limitant à certaines populations de diatomées) ;

- l'azote minéral varie entre 44 $\mu\text{g/l}$ et 340 $\mu\text{g/l}$, ces valeurs chutent à la période de la poussée planctonique jusqu'en août ; au contact des sédiments de surface ces valeurs atteignent 315, voire 590 $\mu\text{g/l}$;

- les teneurs en phosphore minéral sont actuellement particulièrement faibles et ne sont jamais supérieures aux limites de détection (3 $\mu\text{g/l}$ de P) ; en septembre et octobre il est possible de déceler des orthophosphates à l'état de traces dans les couches supérieures de la lame d'eau ;

- les analyses chimiques des sédiments de surface indiquent qu'ils renferment peu de phosphore lié à la matière organique ; les eaux interstitielles sont pauvres en cet élément ; à l'opposé elles renferment des concentrations importantes en fer et en manganèse qui n'étaient pas identifiées dans la colonne d'eau.

2.6.2. Chimie des sédiments anciens

Le cas du phosphore

Dans les petits lacs, l'augmentation des orthophosphates varie avec la profondeur et avec la présence de particules fines en suspension lesquelles se lient avec les colloïdes (hydroxydes de fer et d'aluminium) (Frinck, 1969 ; Williams *et al.*, 1971, 1976 ; Lernam, 1978 ; Viel, 1983). Le phosphore est un élément mobile ; 80% de cet élément, à l'état dissout dans les eaux lacustres, sont incorporés aux sédiments ; mais il est à l'inverse très rapidement remis en solution à l'interface eau/sédiment (Allen et Kramer, 1972). Le sol est la principale source de cet élément (Chang et Jackson, 1958 ; Gumerman, 1970 ; Allen et Kramer, 1972 ; Hartikainen, 1979). Le phosphore peut se rencontrer sous 4 formes principales dans les sédiments lacustres (Norwell, 1974 ; Williams *et al.*, 1971, 1976 ; Viel, 1983) :

- en premier lieu, le phosphore peut être constitutif des réseaux cristallins de l'apatite et de la vivianite ;

- il entre également dans la composition de la matière organique autochtone (plancton, necton) ou allochtone (apports d'eaux usées) sous forme d'esters ;

- cet élément peut être adsorbé par les particules argileuses, les hydroxydes de fer et de manganèse, les aluminosilicates amorphes ;

- enfin, il rentre aussi dans la composition des carbonates (Otsuki, Wetzel, 1972 ; Avnimelech, 1983) l'échange du phosphore entre les sédiments et l'eau est *a priori* le plus important à observer, ces échanges sont souvent contrôlés par la vivianite et l'apatite à pH

Composition chimique

compris entre 6.8 et 8.3. La figure 2.89 résume le cycle du phosphore et de ces différentes formes dans l'eau et les sédiments.

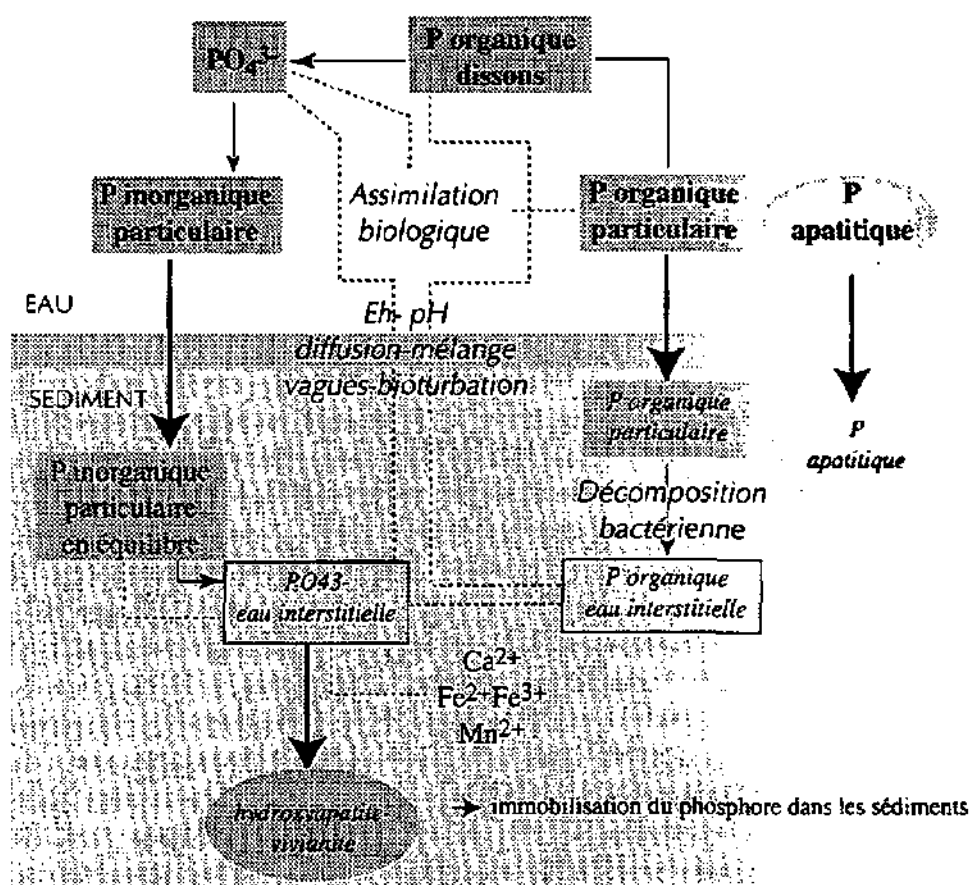


Figure 2.89 : Cycle du phosphore dans l'eau et les sédiments (d'après Gumerman, 1970 ; Viel, 1983)

L'objectif de cette étude n'était pas de détailler les mécanismes de fixation et de relargage du phosphore ; les différentes méthodes d'analyse du phosphore n'ont pas été mises en oeuvre. De fait, les données de la littérature ont permis d'expliquer, en partie seulement, la variation des orthophosphates à la fin de la période subboréale.

A Ilay, l'apatite et la vivianite n'ont pas été identifiées par la diffraction aux rayons X ; si ces éléments sont présents, ils le sont en quantité très inférieure à la limite de détection. La microscopie optique pourrait, dans ce cas, apporter des informations supplémentaires. A la fin du Subboréal, le taux de matière organique reste constant ; les orthophosphates dosés correspondent, d'une part à ceux qui étaient liés à la phase carbonatée et d'autre part à la matière organique. La zone géochimique G2 (au Subatlantique) permet d'envisager des apports d'orthophosphates allochtones (qui ne soient ni des carbonates ni de la matière organique) pour la zone G1 au cours du Subboréal. On remarque que dans les niveaux de gyttjas le taux de carbone organique croît, mais la hausse du taux de phosphore n'atteint pas les valeurs du Subboréal. La quantité d'orthophosphates provenant de la matière organique est donc faible. Une partie des orthophosphates peut donc provenir d'apports allochtones de nature minérale ou sous forme de soluté (phosphates organiques dissous) par des eaux usées. Le taux de silice souligne une diminution très légère des apports détritiques dans le lac.

La variation du taux de PO_4 , observée à Ilay, correspond donc à des conditions d'incorporation du phosphore dans la précipitation des carbonates qui ont progressivement changé. Cette hypothèse est étayée par les travaux d'Otsuki et Wetzel (1972) qui montrent une diminution des potentialités de co-précipitation de PO_4 quand le pH de l'eau diminue. Ces conditions sont atteintes lorsqu'il y a une diminution de l'activité photosynthétique des plantes aquatiques ; la température et la concentration des autres ions dans les eaux lacustres contrôlent également la remise en solution de ces carbonates complexes (Avnimelech, 1983). D'autres auteurs, (Zicker *et al.*, 1956 ; Kramer *et al.*, 1972 ; Hartikainen, 1979) montrent que l'agitation des sédiments de surface conduit très rapidement à une remise en solution de P et que celui-ci ne reste pas libre en solution longtemps. Ce phosphore sert à la production primaire ; P a toujours une position clé comme facteur de régulation dans la productivité d'un lac (Hartikainen, 1979 ; Viel, 1983).

A partir des données de la littérature, la diminution régulière des orthophosphates dans la craie lacustre de la fin du Subboréal peut être interprétée comme une modification de la co-précipitation des PO_4 avec les carbonates.

Cette modification traduit des changements de conditions du milieu (pH de l'eau, température ...) qui pourraient être d'origine climatique. La stratification des isotopes de l'oxygène montre des tendances vers des valeurs plus négatives à deux reprises. Cette baisse des $\delta^{18}\text{O}$ traduit une hausse du niveau lacustre accompagnée d'une baisse de la température moyenne.

De plus, les indices polliniques d'anthropisation montrent une diminution brusque parallèlement à la baisse régulière des orthophosphates. Ces indices suggèrent une diminution des apports de phosphates organiques dissous de l'île vers le lac (Chaix *et al.*, 1989).

Il est très probable que la diminution du taux d'orthophosphates dans les craies lacustres d'Ilay, à la fin du Subboréal, soit le résultat d'une dégradation climatique accompagnée d'une baisse des apports de phosphates d'origine anthropique sans qu'il soit possible de distinguer le poids de chacun d'eux.

Les autres éléments chimiques

Dans la seconde moitié du Subatlantique, la gyttja montre une augmentation des éléments chimiques qui lui sont liés (carbone organique, Al, K, Fe, Na, PO_4). La hausse du taux de matière organique dans le sédiment ne renvoie pas à une augmentation très significative du taux des phosphates comme le signalent certains auteurs (Avnimelech, 1983 ; Hartikainen, 1979). Les éléments liés à la phase carbonatée proprement dite régressent (Ca, Mg, Sr, Mn). La matière organique peut libérer du fer, du potassium et du sodium (Mattson et Koulter-Anderson, 1954, 1955). L'analyse minéralogique du résidu insoluble total montre une régression des argiles pendant cette période ; le fer et l'aluminium ne proviennent donc pas des argiles, mais de la tourbe (Mitchel, 1954 ; Finney *et al.*, 1968 ; Largin *et al.*, 1972).

Les sédiments subactuels, bien que présentant un taux de matière organique important, manifestent des différences avec les niveaux compris entre -60 et -30 cm de profondeur. Le calcium diminue, mais Mg et Sr ne montrent pas de variations. Le manganèse varie de manière opposée à celle qui était observée précédemment. Ces

Composition chimique

changements proviennent de la matière organique alors que d'autres sont d'origine détritique, comme ceci est souligné par la minéralogie du sédiment total.

2.6.3. Les données isotopiques

La zone littorale, dans laquelle le forage a été fait, est caractérisée par des conditions physiques instables comme des épisodes de plus haute énergie, des changements rapides de température, des variations du taux de CO₂, du pH et des variations du niveau de l'eau (Kelts, Talbot, 1990). Les différences enregistrées entre les courbes des deux carottes courtes sont la meilleure illustration de cette variabilité littorale (Filippi, 1996).

Les changements isotopiques observés ici peuvent être interprétés en termes de fluctuations du niveau lacustre. Magny *et al.*, (1995) ont établi un schéma de fluctuations de ce plan d'eau qui apparaît synchrone des variations du niveau d'autres lacs jurassiens dont le déterminisme semble être climatique. Les données du lac d'Ilay s'intègrent parfaitement à un schéma régional des variations du niveau des lacs établi dans le Jura depuis quelques années (Magny, 1992 a, b ; 1993 a, b, c, d). Les données de ces forages (bien qu'indépendants) retracent nécessairement une histoire commune dont chaque discipline livre un signal, une évolution qui lui est propre. Une incertitude peut toujours persister en ce qui concerne les corrélations entre les différentes carottes, mais le niveau de gytja est un bon repère lithostratigraphique. Par ailleurs, des indices polliniques communs aux deux études (Magny *et al.*, 1995 ; Filippi, 1996) permettent de placer précisément la limite Subboréal-Subatlantique, figure 2.90.

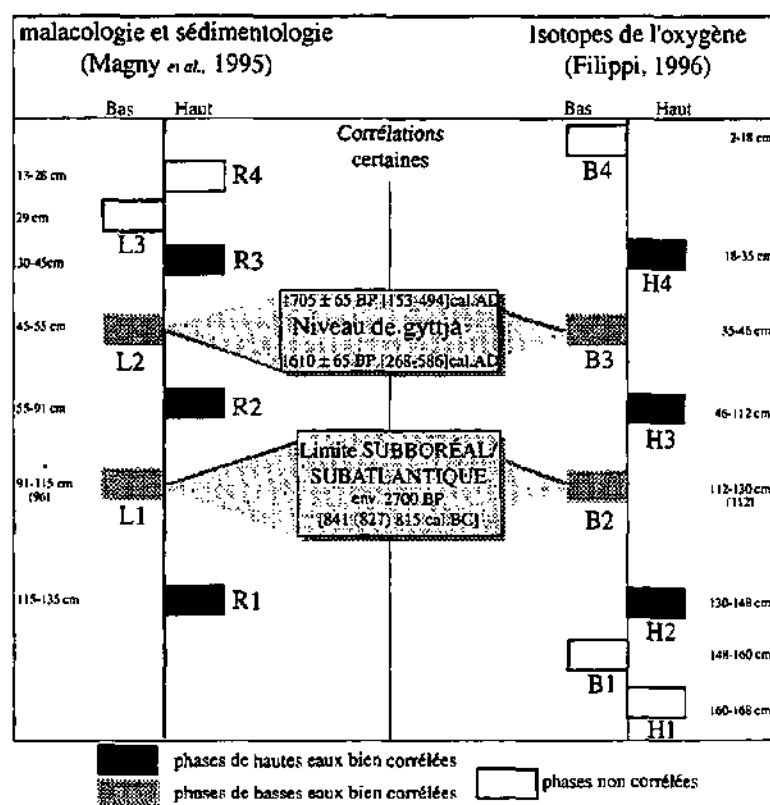


Figure 2.90 : Comparaison des fluctuations du niveau lacustre à partir des données malacologiques et sédimentologiques (d'après Magny *et al.*, 1995) et des données isotopiques de l'oxygène 18 (d'après Filippi, 1996)

- Trois phases de haut niveau lacustre R1, R2, R3 (Magny *et al.*, 1995) sont corrélées à H2, H3 et H4 (Filippi, 1996). Les données isotopiques ne permettent pas, après 586 AD de distinguer plusieurs hauts niveaux ; H4 semble correspondre à R3 et R4 parce que L3 est peu dilatée.

- Deux phases de bas niveau L1 et L2 correspondent à B2 et B3. L1 et B2 se situent vers 820 cal. BC alors que L2, B3 sont calées entre 153 et 586 cal. AD.

Les isotopes de l'oxygène permettent de mettre en évidence trois événements supplémentaires (H1, B1 et B4) qui ne sont pas documentées dans le forage de Magny *et al.*, 1995.

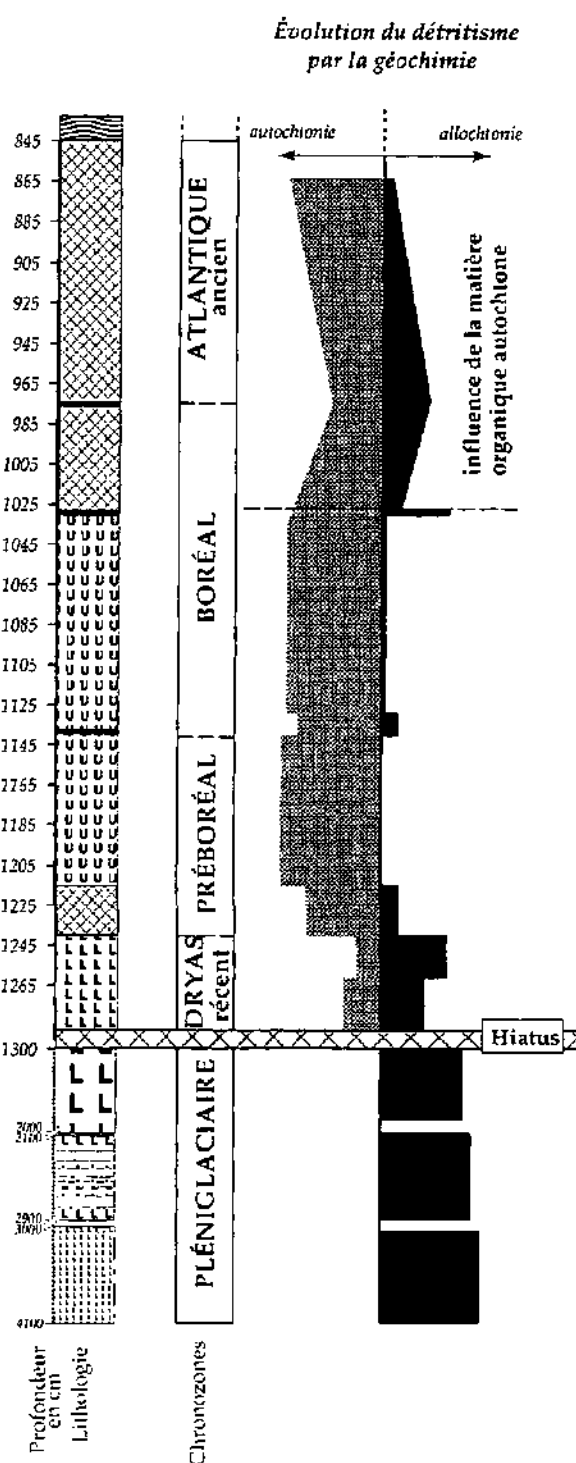
Les phases de hausse du niveau des lacs apparaissent synchrones des phases d'avancées des glaciers et de fluctuations de la limite supérieure de la forêt en Suisse et dans les Alpes autrichiennes (Magny, 1992 a, b ; 1993 a, c, d ; 1994 ; 1995 a, b, c, d). Les phases R1, R2, R3 et R4 coïncident avec les phases alpines de Löbben, Göschenen 1, Göschenen 2 et le Petit Age Glaciaire.

3. HISTOIRE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET CHRONOZONATION AU LOCLE ET À ILAY

Le Pléniglaciaire

Le Pléniglaciaire est caractérisé chimiquement par trois tendances du taux de magnésium qui renvoient aux trois variations du pourcentage de dolomite. Ces tendances confirment une mise en place des dépôts détritiques non continue pour cette période (figure 2.91).

Figure 2.91 : Évolution du détritisme chimique au cours du Pléniglaciaire, du Tardiglaciaire et de l'Holocène



Composition chimique

Le Dryas récent

La géochimie comme la minéralogie ne permettent pas de mettre en évidence l'important hiatus sédimentaire correspondant à la majorité du Tardiglaciaire. La palynologie est la seule discipline à le caractériser. La distribution des éléments chimiques souligne, comme le fait la minéralogie, la bipartition de la fin du Dryas récent dans le forage LLC1-2. La partie profonde (1300 - 1260 cm) est dominée par les éléments liés aux silico-clastiques d'origine détritique. Dans cette intervalle, il y a une diminution régulière de Mg, Si, Na, K, Fe, Mn et PO_4 ; à l'opposé, une tendance à la hausse des éléments liés aux minéraux autochtones (Ca et Sr) se dessine parallèlement. Cette partie suggère une phase d'amélioration des conditions climatiques dans le Dryas récent. La seconde partie de la fin du Dryas récent (1260 - 1240 cm) montre une diminution des éléments liés à la phase carbonatée autochtone au détriment d'une recrudescence des éléments liés aux minéraux détritiques (Mg, Si, PO_4). Cette modification géochimique suggère un épisode plus détritique à la fin du Dryas récent.

Le Préboréal

Le début du Préboréal, correspondant au niveau de gyttja, se traduit par une diminution de Ca et Mg (liés aux carbonates autochtones) au profit d'une hausse de Sr, Na, K, PO_4 (provenant des minéraux détritiques). Cet épisode est suivi par un retour marqué du calcium associé à une chute de Mg et de tous les éléments liés aux minéraux détritiques ; c'est véritablement le début de la sédimentation authigénique holocène au Locle. A 1137 cm, une intercalation de matière organique marque la fin de cette période. La géochimie montre dans ce niveau une hausse de tous les éléments détritiques ; leur apparition a débuté progressivement dans la craie lacustre. Les données de la géochimie confirment la présence de deux phases détritiques correspondant à deux faciès de bas niveaux lacustres (gyttjas et tourbes) qui apparaissent au début et à la fin du Préboréal. Les craies lacustres de cette période ne montrent pas de variation de leur composition chimique.

Le Boréal

Le Boréal est, comme en minéralogie, divisé en trois parties. La première (entre 1137 et 1085 cm) montre une tendance régressive des éléments détritiques. La seconde, entre 1085 et 1025 cm, permet d'observer un retour de K, PO_4 , Fe, Si (les hausses sont peu importantes). La troisième débute avec les craies organiques où un retour très net de la silice, de l'aluminium, du potassium, du fer et des orthophosphates, associé à une diminution du calcium et du strontium, est observée. Cette variation géochimique coïncide avec le début des craies lacustres organiques. Dès lors, les éléments Al, Fe, K, Na, Si peuvent avoir deux origines : l'une allochtone et l'autre autochtone (matière organique). La variation chimique est, dès cette période, beaucoup plus le reflet des changements sédimentaires que celui des variations des apports allochtones (figure 2.91).

L'Atlantique

L'Atlantique ancien (LLC1-2) correspond à une sédimentation complexe dominée par les gyttjas et les première tourbes (LLC2). Les éléments attachés partiellement aux silico-

clastiques et à la matière organique sont présents en permanence parallèlement à une hausse des taux de calcium et de strontium.

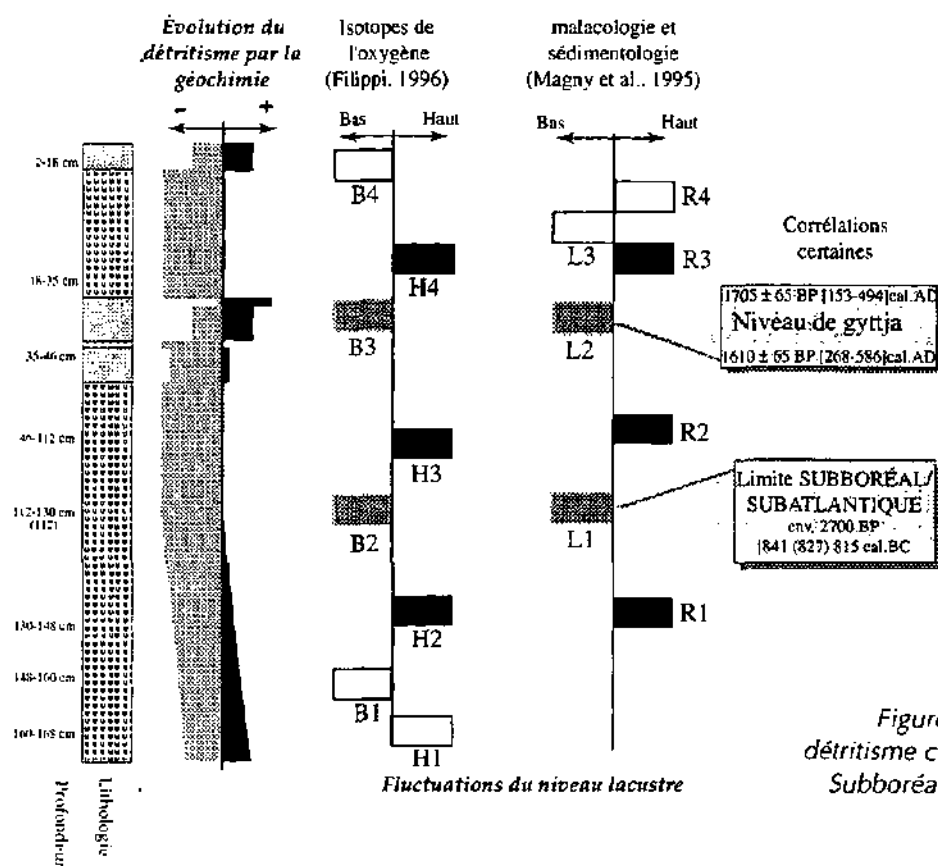
La fin de l'Holocène est, au Locle, trop influencée par les changements rapides de faciès sédimentaires pour y observer les variations d'un paramètre géochimique qui soit indépendant de la variation de la composition de ces faciès. En effet, les gyttjas et les tourbes peuvent montrer des taux de silice, de fer, de potassium et d'orthophosphates aussi élevés que dans les argiles silteuses grises du Pléniglaciaire. L'Atlantique récent, le Subboréal et le Subatlantique apparaissent mal documentés au Locle. La sédimentation carbonatée autochtone du forage d'Ilay permet de pallier, en partie, à cette déficience.

Le Subboréal

La fin du Subboréal est caractérisée à Ilay par une diminution régulière du taux d'orthophosphates. Cette diminution se déroule parallèlement à des variations du $\delta^{18}\text{O}$ qui sont plus négatives, lesquelles sont brusquement interrompues par un gradient moins négatif. Ces valeurs moins négatives rendent compte d'une baisse temporaire du niveau lacustre à l'intérieur d'une phase de hautes eaux enregistrée vers la fin du Subboréal.

Le Subatlantique

A Ilay, (figure 2.92) les craies lacustres du Subatlantique ont une composition chimique différente de celles des craies de la fin du Subboréal. Ce faciès a également une composition



Composition chimique des sédiments

très différente de celui du Locle : ces craies sont plus riches en silice, potassium, fer, phosphates comme le montre le tableau de comparaison 2.6. Les craies d'Ilay ont des teneurs en calcium plus élevées. Les taux de manganèse, de fer et d'aluminium sont les mêmes. La composition des gyttjas est également très différente sur les deux sites. Les teneurs en Ca, Mg, Sr, Si, Al, Fe et PO_4 sont globalement plus élevées au Locle. Mais les taux de sodium, de potassium et de manganèse sont identiques sur les deux sites (tableau 2.6).

	Craies		Gyttjas	
	Le Locle	Ilay	Le Locle	Ilay
Ca	38.115	36.867	28.062	24.547
Mg	0.311	0.056	0.325	0.052
Sr	0.186	0.007	0.137	0.005
Si	0.184	0.140	0.701	0.363
Al	0.008	0.011	0.104	0.052
Na	0.005	0.010	0.007	0.014
K	0.005	0.004	0.018	0.010
Fe	0.081	0.055	0.245	0.179
Mn	0.009	0.009	0.009	0.005
PO_4	0.047	0.023	0.073	0.017

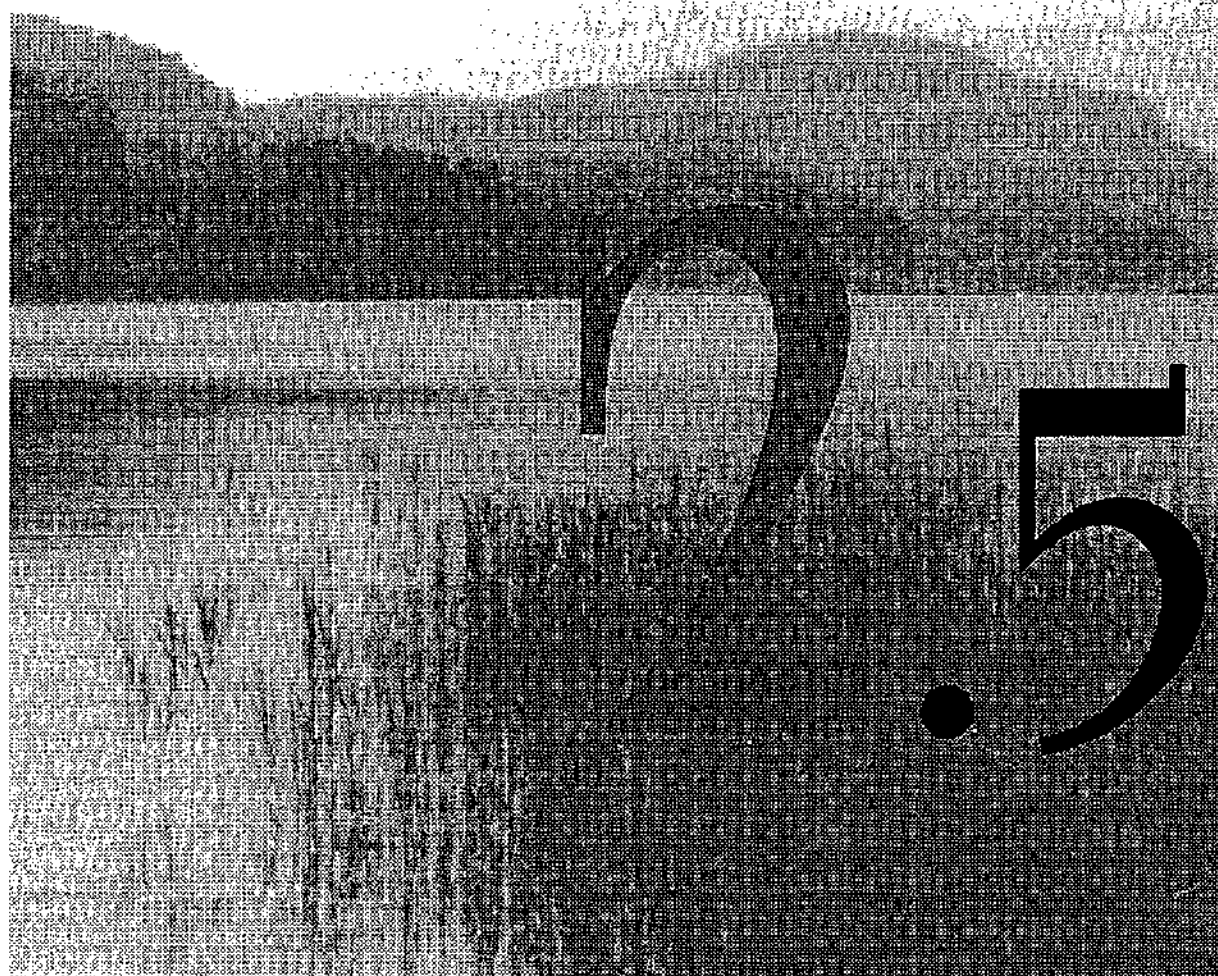
Tableau 2.6 : Comparaison des pourcentages de chaque élément majeur dans les craies lacustres et dans les gyttjas du Locle et d'Ilay

- Les paramètres chimiques qui ont été dosés ne montrent aucune variation entre le début du Subatlantique (vers 2700 BP soit [841 (827) 815] cal. BC) et le début des gyttjas daté vers 1610 ± 65 BP soit [268 - 586] cal. AD.

- La géochimie souligne très bien, comme la minéralogie, la malacologie et la sédimentologie, le changement de sédimentation correspondant à un bas niveau lacustre exprimé lithologiquement par la gyttja. Ce faciès est daté entre 1610 ± 65 BP soit [268 - 586] cal. AD et 1705 ± 65 BP soit [153 - 494] cal. AD. Les changements observés (diminution de Ca, Mg, Sr et Mn et à la hausse de SiO_2 , Al, Na, K, Fe et PO_4) traduisent cette variation sédimentaire qui s'est déroulée entre 153 et 586 cal. AD.

- Entre 586 et 1394 cal. AD (date dendrochronologique), vers 20 cm (Magny *et al.*, 1995), la sédimentation est à nouveau carbonatée, mais ne montre plus chimiquement de tendance significative. Pour la période correspondant au Petit Age Glaciaire et à l'actuel, entre 20 et 0 cm), les données de la géochimie montrent surtout l'évolution de la sédimentation des craies lacustres vers une gyttja. Les isotopes du carbone et de l'oxygène confirment cette tendance vers un abaissement du niveau lacustre.

*Reconstitution
paléohydrologique
au Col-des-Roches*



La paléohydrologie du Col-des-Roches

1. LES ANALYSES SÉDIMENTOLOGIQUES

Les analyses sédimentologiques du paléolac du Col-des-Roches ont porté sur les forages LLC1-3, LLC1-4 et LLC1-5. Cette investigation a pour objet de préciser les variations tardiglaciaires et holocènes du niveau lacustre susceptibles d'être mises en regard des données de la palynologie, de la minéralogie et de la géochimie. La méthode utilisée par M. Magny à Besançon, n'a pu être appliquée qu'aux sédiments carbonatés entre 832 et 1300 cm de profondeur.

La séquence sédimentaire qui est présentée ici est une séquence de comblement montrant les trois grands types de dépôts classiquement rencontrés dans les cuvettes lacustres jurassiennes (Magny, 1992). Des argiles silteuses grises fortement carbonatées d'origine glaciaire et tardiglaciaire précèdent un épisode carbonaté authigénique (les craies lacustres). Cette craie va se charger progressivement en matière organique jusqu'au stade ultime d'atterrissement.

La figure 2.93 montre les principaux événements paléohydrologiques identifiées dans les forages étudiés ; Ces événements sont au nombre de 6 et sont numérotés de s 1 à s 6. Trois grands ensembles peuvent être identifiés, ils correspondent à une partie du Tardiglaciaire pour le premier, au Préboréal pour le second et au Boréal-Atlantique ancien pour le troisième.

La paléohydrologie

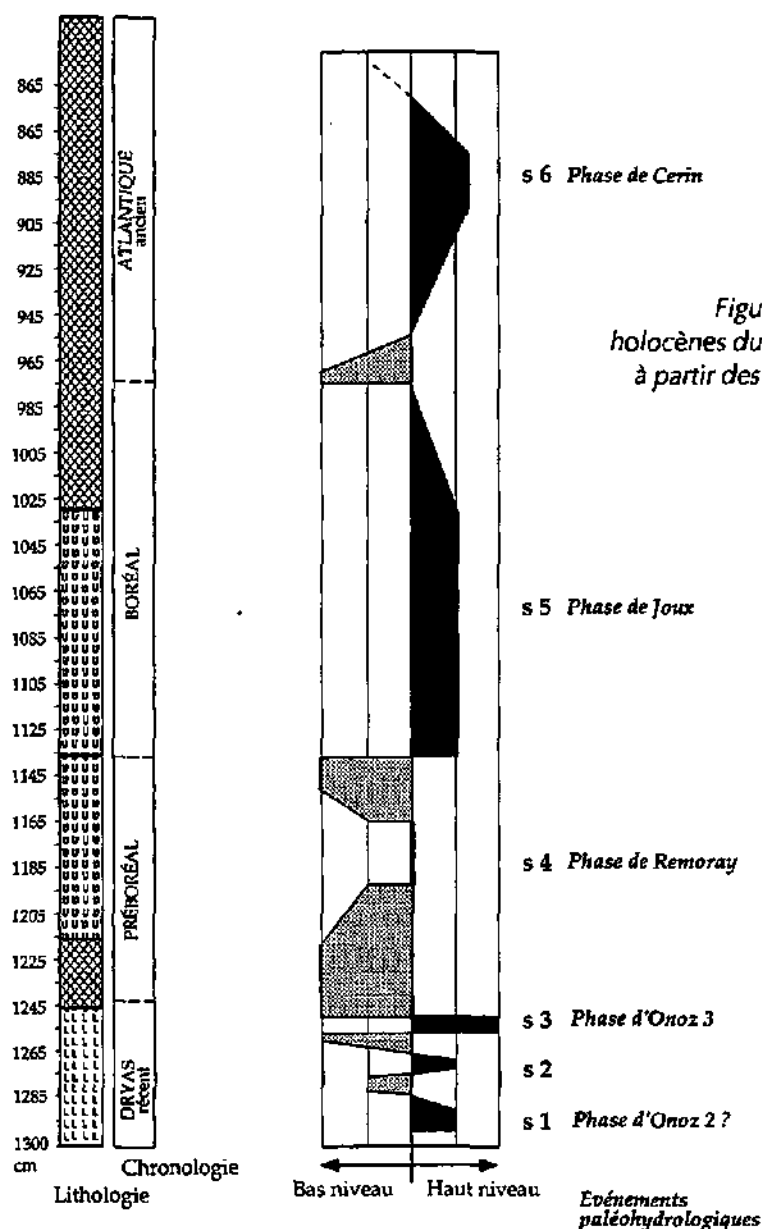


Figure 2.93 : Fluctuations tardiglaciaires et holocènes du paléolac du Col-des-Roches (NE, CH) à partir des analyses sédimentologiques : résultats préliminaires (d'après M. Magny)

La fin du Dryas récent est marquée par une tendance régressive interrompue par 3 épisodes transgressifs (s 1, s 2 et s 3) ; le dernier correspond à la plus forte hausse.

Le début du Préboréal est marqué par un changement relativement brutal de la sédimentation (passage des argiles silteuses à de la gyttja). La gyttja contient encore des éléments détritiques (sables, dolomite, quartz) mais également des carbonates authigènes et d'abondants débris végétaux entre 1245 et 1215 cm de profondeur. Ces particularités traduisent la présence d'une tranche d'eau peu importante. Toutefois, une transgression de faible importance peut être décelée au milieu du Préboréal (événement s 4).

La limite entre le Préboréal et le Boréal est soulignée par l'intercalation d'un niveau organique à 1137 cm qui témoigne d'une baisse importante de la hauteur d'eau. Une datation ^{14}C de ce niveau apporte peu d'informations, la date obtenue (9750 ± 80 BP soit [9061 - 8631] cal. BC) est trop vieille d'environ 750 ans par rapport aux données polliniques très bien documentées régionalement pour cette période.

Le début du Boréal est marqué par le retour à une sédimentation carbonatée correspondant à l'amorce d'une phase transgressive (s5). Ce haut niveau se maintiendra

pendant les deux premiers tiers du Boréal. Vers la fin de cette chronozone, de la matière organique se mêle de plus en plus à la craie lacustre. Ce changement témoigne d'un affaiblissement progressif de la profondeur d'eau.

A la transition Boréal-Atlantique ancien, la régression amorcée pendant le Boréal s'affirme véritablement. Lithologiquement, le sédiment contient moins de matériel végétal. L'abaissement est comparable à celui qui a été relevé au cours du Préboréal. La seconde moitié de l'Atlantique ancien présente une hausse du niveau (s 6) dépassant en intensité la transgression boréale.

La fin de cette chronozone montre une tendance à la régression qui paraît se poursuivre pendant l'Atlantique récent. La présence de plus en plus importante de matériel tourbeux dans le forage confirme l'atterrissement déjà bien amorcé.

2. LES ANALYSES MALACOLOGIQUES

Ces analyses ont porté sur la série de forages LLC1-2, LLC1-3 et 4, puis sur les forages LLC1-5 et 6 pour atteindre 13 m de profondeur avec des sédiments non perturbés. L'échantillonnage a été effectué systématiquement tous les 5 cm. L'étude a été menée par J. Mouthon du CEMAGREF à Lyon ; 26 espèces de mollusques dulcicoles dont 17 espèces de gastéropodes et 9 espèces de bivalves ont été identifiées. A

partir d'analyses qualitatives et quantitatives des peuplements de mollusques, il a été possible de mettre en évidence différentes fluctuations de la hauteur d'eau du lac généralement dépendantes des conditions climatiques (Clerc *et al.*, 1989 ; Mouthon, 1989, 1990, 1992 a et b). Les résultats paléohydrologiques obtenus sont présentés sur la figure 2.94.

Onze épisodes transgressifs majeurs alternant avec des bas niveaux ont pu être dénombrés. D'autres fluctuations, mineures, ont également été repérées mais ne sont pas détaillées ici en raison de leurs faibles amplitudes.

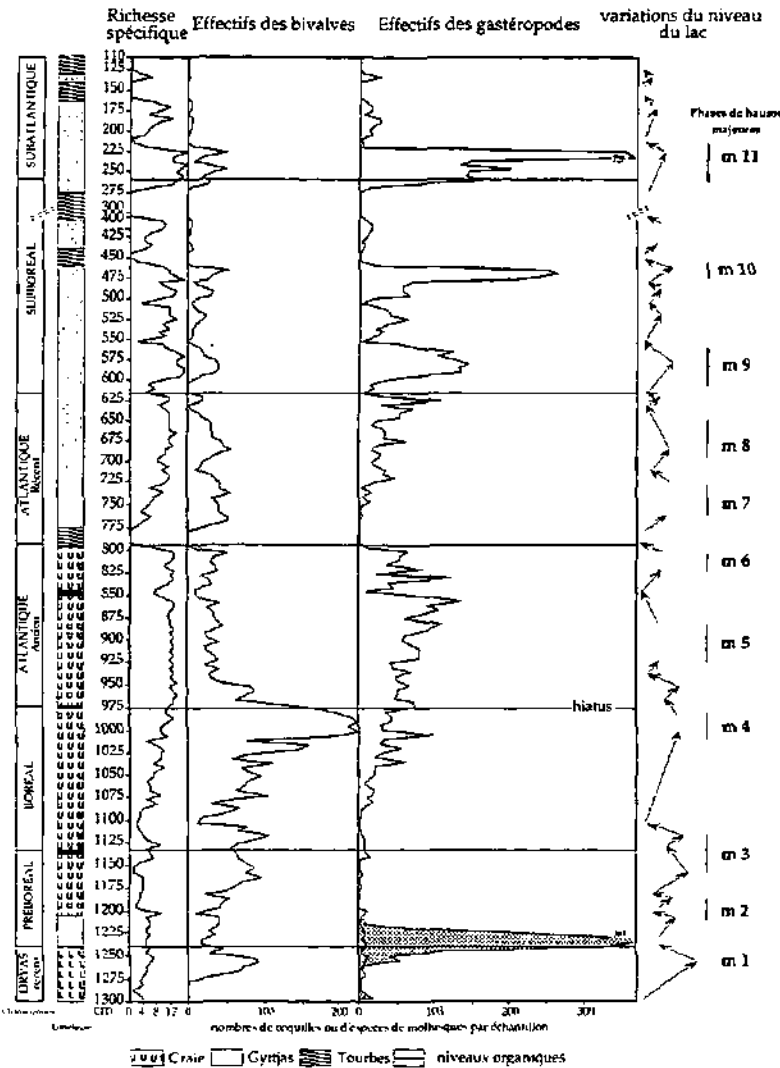


Figure 2.94 : Fluctuations tardiglaciaires et holocènes du Paléolac du Col-des-Roches (NE, CH) à partir des analyses malacologiques : résultats préliminaires (d'après les données de J. Mouthon)

La paléohydrologie

Pauvres en mollusques, les premiers niveaux (cotes 1300 à 1275 cm) se sont probablement déposés sous une faible hauteur d'eau. Dans la dernière partie du Dryas récent, on observe une forte augmentation des bivalves liée à une augmentation de la hauteur d'eau (m 1), puis leur diminution consécutive à une baisse du niveau du lac survenant à la transition Dryas récent-Préboréal. De nombreux gastéropodes d'âge tertiaire (zone grisée) sont identifiés dans les sédiments couvrant la fin du Dryas récent. Cette faune est héritée des marnes oeningiennes (Favre, 1911 ; Favre *et al.*, 1937).

Le début du Préboréal est marqué par une forte augmentation des effectifs des gastéropodes tertiaires qui disparaissent peu après la cote 12 m ce qui correspond à un changement de sédimentation (fin de la gyttja et début des craies lacustres). Les deux transgressions (m2) qui surviennent pendant les deux premiers tiers du Préboréal, au cours desquelles la hauteur d'eau apparaît assez limitée, sont de faible amplitude. En revanche, l'élévation du niveau (m 3) qui se produit à la fin de cette chronozone, et qui se poursuivra au Boréal, est plus conséquente.

La phase transgressive qui survient au début du Boréal (m 3), immédiatement après une baisse de niveau de faible ampleur à la transition Préboréal-Boréal, est suivie par une phase régressive courte mais de forte amplitude (cote 1100). Dès lors, la hauteur d'eau augmente progressivement jusqu'à la fin du Boréal (m 4).

La régression qui s'amorce à la fin du Boréal se poursuit à l'Atlantique ancien dont le début n'a pas laissé d'enregistrement sédimentaire (hiatus). A partir de la cote 925, la hauteur d'eau augmente sensiblement (m 5) mais demeure limitée, comme en témoigne l'augmentation du nombre des gastéropodes alors que les effectifs des bivalves restent faibles. A la cote 850 le niveau du lac baisse nettement ; les effectifs des gastéropodes, en particulier, diminuent brusquement. La fin de l'Atlantique ancien est marqué par une phase transgressive (m 6) qui s'interrompt au début de l'Atlantique récent.

A l'Atlantique récent, deux phases transgressives (m 7 et m 8) sont observées. Dans les tourbes qui se mettent en place entre les transgressions m 6 et m 7, les mollusques disparaissent presque totalement. La reprise de la sédimentation carbonatée (m 7), qui souligne cette hausse du niveau de l'eau, s'accompagne d'une recolonisation du milieu par la faune malacologique. Une phase d'abaissement, essentiellement marquée par une diminution des effectifs des bivalves, précède une nouvelle phase transgressive (m 8). Un abaissement suivi d'une élévation de faible amplitude vont marquer la transition Atlantique récent - Subboréal.

Le Subboréal est caractérisé par une tendance à l'atterrissement. La fréquence d'apparition des sédiments organiques dans les craies est globalement plus élevée. Les effectifs des bivalves diminuent du début à la fin du Subboréal, alors que les effectifs des gastéropodes varient en sens opposé. Deux hauts niveaux majeurs (phases m 9 et m 10) ont été repérés ; plusieurs transgressions mineures peuvent être associées aux phases 9 et 10. La présence de niveaux de tourbe et l'absence de mollusques à la fin du Subboréal témoignent de l'installation d'épisodes régressifs marqués.

Au début du Subatlantique on assiste à une recolonisation du milieu par les mollusques liée à l'augmentation de la hauteur d'eau (phase m 11). A partir de la cote 220, le nombre de bivalves, de gastéropodes et la richesse spécifique diminuent rapidement. Au sommet du sondage, la mise en place d'un faciès tourbeux et la disparition totale des mollusques annoncent l'atterrissement du milieu.

3. COMPARAISONS DES DONNÉES DE LA MALACOLOGIE ET DE LA SÉDIMENTOLOGIE

La composition de la faune malacologique de la phase m 1 ne permet pas d'observer, dans le détail, les oscillations mises en évidence par la sédimentologie (phases s1, s2 et s3) à la fin du Dryas récent (figure 2.95).

Au cours du Préboréal, les données sédimentologiques traduisent une tendance à l'élévation du plan d'eau (événement s4) qui est, d'après les données malacologiques, scindée en deux épisodes (phase m 2). Dans la dernière partie de cette période, on observe une divergence entre les résultats de ces deux approches indépendantes. En effet, les populations de mollusques indiquent la présence d'un niveau du lac relativement plus élevé (m 3) que celui du milieu du Préboréal alors que les données sédimentologiques montrent toujours la présence d'un très bas niveau.

Pendant le Boréal, les résultats de la malacologie et de la sédimentologie sont contradictoires. Les peuplements de mollusques indiquent, dans la première moitié du Boréal, des bas niveaux (interrompus par un haut niveau, fin de m 3). La seconde moitié de

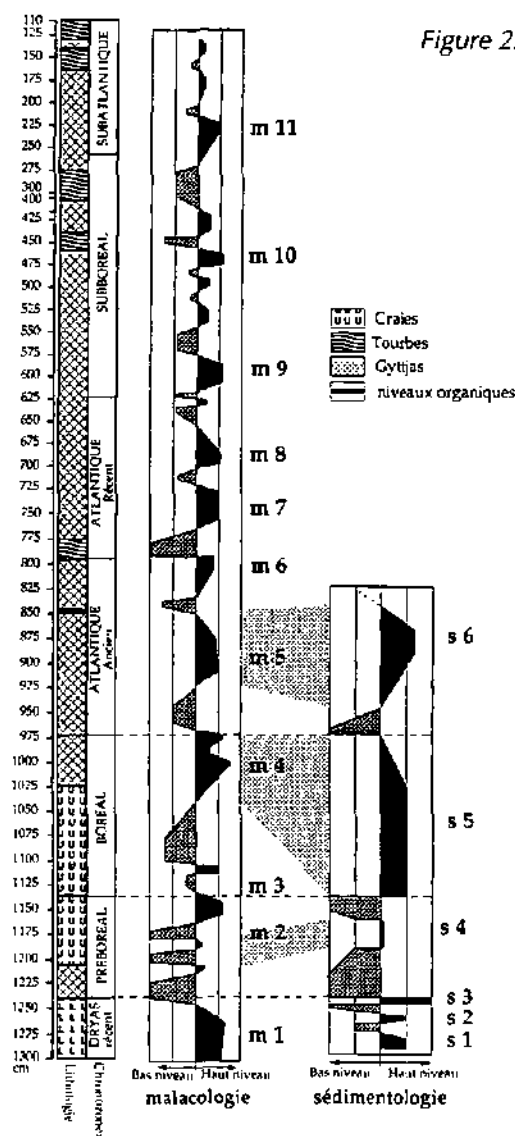


Figure 2.95 : Comparaison des données de la malacologie et de la sédimentologie

La paléohydrologie

cette période est caractérisée, en malacologie, par des hauts niveaux du lac (m 4). En revanche, les concrétions carbonatées indiquent la présence d'une phase transgressive (s 5) pendant les deux premiers tiers du Boréal qui est suivie par une tendance régressive vers la fin de cette période.

A l'opposé, le faciès régressif (gyttja dans la craie lacustre) du début de l'Atlantique ancien est corroboré par les résultats des deux disciplines. Un épisode transgressif (m 5, s 6), encadré par deux phases de bas niveau, est observé au cours de l'Atlantique ancien.

4. COMPARAISON DES RÉSULTATS DU LOCLE AVEC LES DONNÉES RÉGIONALES

Les changements paléohydrologiques enregistrés dans les remplissages des lacs du Jura ont permis de proposer une reconstitution détaillée des oscillations climatiques depuis l'Allerød jusqu'à l'actuel (Magny, Ruffaldi, 1995). Les variations hydrologiques reconstruites à partir des données de la sédimentologie sur le site du Col-des-Roches s'intègrent parfaitement dans le schéma régional des variations des niveaux lacustres qui a été établi par Magny (1992, 1993, 1994, 1995 a, b et c) figure 2.96. Mais les contradictions relevées dans les données préliminaires de ces deux disciplines incitent à la prudence s'agissant des corrélations avec les données régionales. Actuellement, des datations radiocarbone supplémentaires sont en cours, elles devraient permettre de préciser le cadre chronologique de ces fluctuations lacustres à la base de ces forages.

Le déficit hydrique des cuvettes lacustres jurassiennes à la fin de l'Allerød et au Dryas récent a été mis en évidence pour la première fois dans les sédiments du lac d'Onoz (Jura, France), d'où le nom donné à ces événements contemporains du Dryas récent (Magny, 1994 ; Magny, Ruffaldi, 1995). L'épisode régressif qui intervient au Dryas récent est encadré par deux phases transgressives (Onoz 2 et Onoz 3).

L'événement s 3 du Locle semble synchrone d'Onoz 3. L'incertitude chronologique caractérisant la base de ces forages et l'absence de datation absolue ne permettent pas d'attribuer avec certitude les événements s 1 et s 2 aux autres phases d'Onoz. Toutefois, s1 pourrait être synchrone d'Onoz 2, s 2 serait une phase supplémentaire non identifiée jusqu'ici ou alors elle serait complémentaire de s 3. Les informations de la malacologie indiquent préférentiellement des hauts niveaux à cette période. La faible représentation des mollusques ne permet pas une perception d'oscillations plus détaillées.

Au cours du Préboréal, les lacs jurassiens subissent une autre phase transgressive. Cet épisode de hausse des niveaux des lacs porte également le nom du lac où elle a été identifiée la première fois : Remoray (près de Saint point) (Magny 1994 ; Magny, Ruffaldi, 1995). Les phases (s 4 et m 2) observées au Col-des-Roches, interprétées comme des périodes de hautes eaux, sont synchrones de cette phase de Remoray.

Chronologiquement, l'événement paléohydrologique (s 5 et m 4) observé dans les sédiments du paléolac du Locle pendant le Boréal paraît correspondre à la phase transgressive de Joux décrite par Magny (1992, 1993, 1995) à cette même période.

L'Atlantique ancien est enregistré, au Col-des-Roches, dans un sédiment traduisant un bas niveau du plan d'eau marqué par la présence de matière organique ; ce bas niveau précède une période de hausse du plan d'eau (événements s 6 et m 5/m 6) qui est

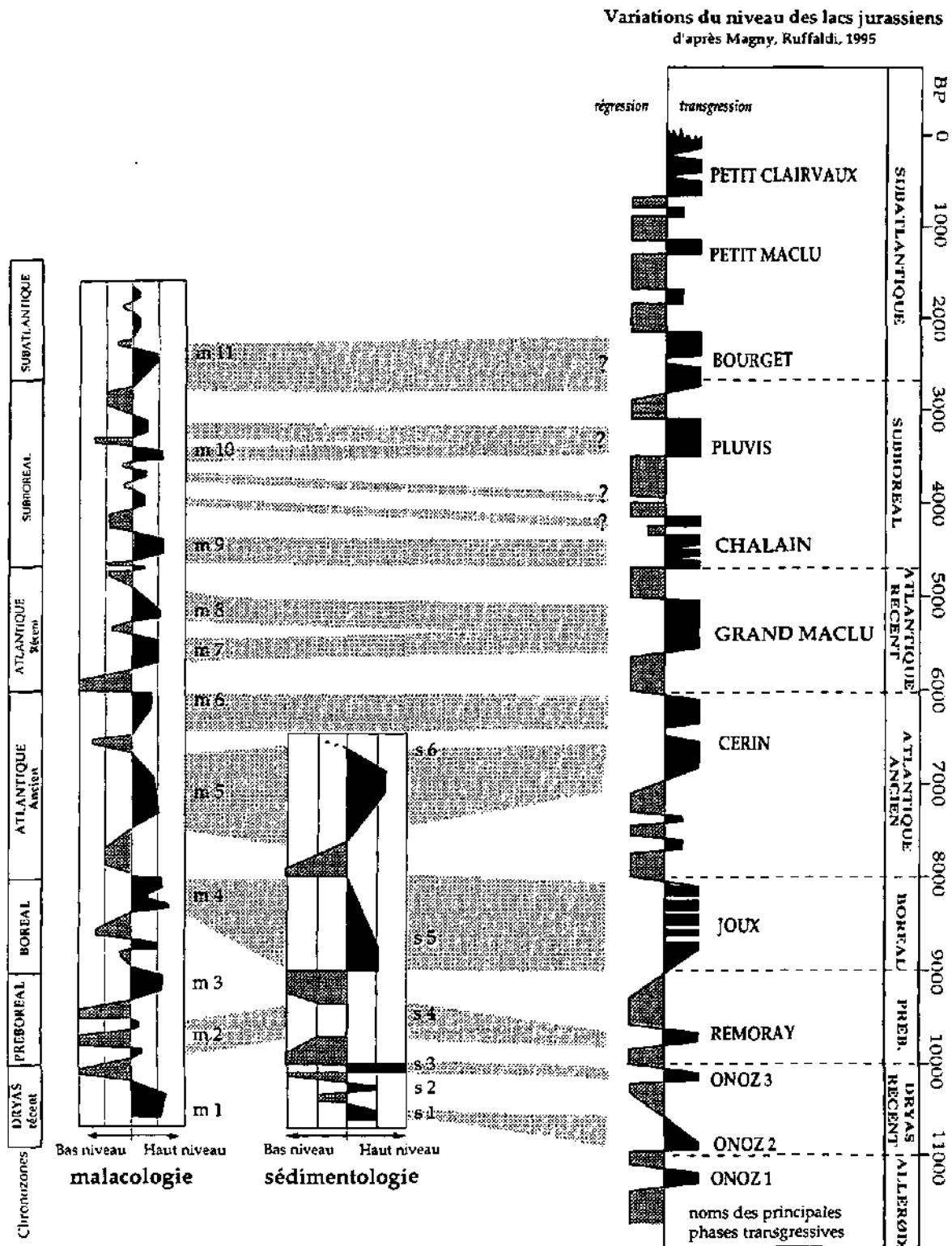


Figure 2.96 : Fluctuations tardiglaciaires et holocènes du Paléolac du Col-des-Roches à partir des analyses sédimentologiques et malacologiques (d'après M. Magny et J. Mouthon) comparées aux données régionales (Magny, Ruffaldi, 1995)

enregistrée dans un sédiment contenant moins de débris végétaux. Les phases transgressives m 5 et m 6 sont séparées par une phase régressive qui se traduit sédimentologiquement par un niveau organique. La phase transgressive m 6 est datée au Locle entre 7210 ± 85 BP soit [6183 (6008) 5869] cal. BC et 6280 ± 65 BP soit [5329-5082] cal. BC. Ces événements transgressifs sont connus dans les autres lacs jurassiens sous le nom de phase de Cerin.

A partir de l'Atlantique récent, le rythme des épisodes transgression/régression mis en évidence par les peuplements de mollusques est relativement élevé. La palynologie et les datations radiocarbone permettent de caler chronologiquement ces phases de manière précise et d'établir une bonne correspondance avec les données sédimentologiques régionales.

Au cours de l'Atlantique récent, les phases de hauts niveaux m 7 et m 8 identifiées en malacologie, qui se déroulent après 6280 ± 65 BP et avant 5125 ± 65 BP peuvent être attribuées à la phase transgressive de Grand Maclu. Les résultats de la malacologie montrent que cette phase de Grand Maclu est plus documentée au Locle.

Dès le début du Subboréal, les lacs des Alpes du Nord et du Jura ne se comportent pas tous de la même manière, un certain nombre d'entre eux peuvent montrer la présence d'une phase transgressive alors que d'autres indiquent plutôt une phase d'abaissement du plan d'eau au cours de la même chronozone (Magny, 1991). L'évènement m 9 (vers 5125 ± 65 BP) peut être considérée synchrone de la phase de Chalain alors que les événements m 10 (vers 4315 ± 75 BP) peuvent soit être l'expression plus détaillée de la phase de Pluvis, soit correspondre à des phases de Chalain. Les différentes phases qui composent m 10, interrompues par plusieurs phases régressives de faibles amplitudes, ne peuvent pas être calées chronologiquement de manière plus précise.

Le dernier événement paléohydrologique majeur du Locle, entre 2525 ± 55 BP soit [805 (767) 409] cal. BC et 2375 ± 85 BP soit [758 (681, 544) 370] cal. BC, paraît synchrone de la phase transgressive du Bourget. Les autres fluctuations mineures pourraient renvoyer à d'autres événements paléohydrologiques connus, mais la précision des dates ^{14}C ne permet pas de les caler précisément.

5. SYNTHÈSE

Cette étude permet de montrer les corrélations existant entre deux approches indépendantes (malacologie et sédimentologie) pour la reconstruction des variations du niveau lacustre du paléolac du Locle. La palynologie et les datations radiocarbone précisent le cadre chronologique relatif et absolu de ces variations du niveau du lac. La comparaison des fluctuations du niveau lacustre présentées sur les figures 2.92 et 2.93 permet d'intégrer ces données dans le schéma régional des fluctuations des lacs jurassiens. Un tel parallélisme a déjà été établi dans le passé sur d'autres sites (Clerc *et al.*, 1989 ; Magny, Mouthon, 1990 ; Magny *et al.*, 1995). Les distorsions observées entre les résultats de la malacologie et de la sédimentologie peuvent être liées à l'utilisation de deux carottes différentes. Les corrélations restent hypothétiques car, à côté des problèmes liés aux forages, vient s'ajouter le problème des datations effectuées sur le sédiment organique total qui ne permet pas un calage chronologique suffisamment fiable.

Ces réserves posées, cette reconstruction, d'après les rythmes transgressifs-régressifs observés et leurs positions chronologiques, peut s'intégrer dans le schéma régional qui a été établi par Magny (1922, 1993) et par Magny, Ruffaldi (1995).

D'autre part, les oscillations paléohydrologiques reconstruites sur les lacs du Jura ont permis à Magny (1992, 1993 a, b, c, 1994 et 1995) de proposer un schéma régional de ces fluctuations lacustres en relation avec les mouvements des glaciers et les variations de la limite supérieure des forêts dans les Alpes. Il a également montré que ces variations du niveau des eaux sont synchrones de certaines phases observées dans les courbes isotopiques des lacs du Plateau suisse et des glaces du Groenland (Magny, 1993). Les épisodes transgressifs des lacs jurassiens, corrélés à ces données provenant de disciplines indépendantes, marquent les principales périodes de dégradation climatique qui sont intervenues depuis le début de l'Holocène.

Troisième Partie

3

*Là, deux ruisseaux cachés sous des ponts de verdure
Tracent en serpentant les contours du vallon;
Ils mêlent un moment leur onde et leur murmure,
Et non loin de leur source, ils se perdent sans nom.*

Le Vallon, 1820 Alphonse de Lamartine

*Synthèse et
conclusions*

Synthèse et conclusions

1. LES APPORTS DE LA GÉOPHYSIQUE ET DES DONNÉES ANCIENNES DE FORAGES AU LOCLE

La méthode de prospection géophysique mise en oeuvre dans cette étude associée à l'homogénéisation des données de forages anciennes permet de proposer une représentation spatiale du toit des formations compactes du remplissage lacustre du Locle et de mettre ainsi en évidence une double dissymétrie dans la morphologie de la base du remplissage. La première dissymétrie est transversale (Nord-Sud) : elle isole une zone profonde, parallèle à l'axe anticlinal, au Nord et une zone moins profonde au Sud. La seconde dissymétrie est longitudinale (Sud-Est/Nord-Ouest) : elle sépare deux bassins de sédimentation dont un dépasse 41 m de profondeur. Ces particularités sont liées à la présence d'accidents structuraux affectant le substratum.

La synthèse des données sédimentologiques issues des forages anciens et récents permet d'appréhender la répartition des corps sédimentaires. De nombreux passages latéraux de faciès sont observés dans la zone la plus profonde du Marais alors que le passage entre les faciès détritiques et les faciès autochtones se fait approximativement à la cote 900 m. Les couches autochtones montrent une certaine tabularité.

2. LES APPORTS DE L'ÉTUDE POLLINIQUE DES SÉDIMENTS DU LOCLE

L'étude du contenu sporopollinique des sédiments du Marais du Col-des-Roches a permis de mettre en évidence, pour la première fois dans la Haute-Chaîne jurassienne, une séquence fini-glaciaire de 28 mètres. Ces données viennent compléter les résultats déjà obtenus sur d'autres sites du Jura (Campy, Richard, 1988 ; Ruffaldi, 1993 et 1996). De nouvelles investigations seront indispensables afin d'étudier, plus en détail, les tendances qui sont observées dans la courbe du pin par exemple et pour rechercher le Tardiglaciaire ; dans cette optique, un forage parfaitement continu est requis. Des datations radiocarbone supplémentaires sont également nécessaires pour caler précisément les différentes étapes de la déglaciation sur ce site. Cette étude a donné l'opportunité de mettre en évidence la présence de pollens de *Poaceae* de type *Cerealia* sans autres indices d'anthropisation entre 7210 ± 85 BP soit [6183 (6008) 5881] cal. BC et 6280 ± 65 BP [5329 (5246) 5062] cal. BC. Les premières marques de l'activité humaine (céréales et rudérales) sont véritablement observées entre 6280 ± 65 et 5210 ± 65 BP. A cette altitude, l'histoire de la végétation holocène sur le site du Locle est assez classique pour cette partie du Jura.

3. SIGNATURES PALYNOLOGIQUES, MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES DANS LES SÉDIMENTS DU LOCLE ET D'ILAY.

La période fini-würmienne :

Le Pléniglaciaire est caractérisé par une végétation quasi inexistante ; le contenu pollinique de ces sédiments (28 m d'argiles silteuses grises avec des intercalations sableuses figure 3.1) résulte de remaniements des formations du substrat et d'apports polliniques lointains (de pin) ; la flore herbacée locale paraît très pauvre. La quasi absence de végétation a favorisé l'attaque des couches les plus facilement érodables à l'aube de la déglaciation. L'étude minéralogique montre, comme la palynologie, l'important héritage des formations tertiaires. La caractérisation minéralogique et géochimique des argiles silteuses permet, pour le forage le plus profond (LLC1), d'identifier trois variantes dans leur composition. L'unité sédimentaire correspondant au Pléniglaciaire (formant 68 % du remplissage) est constituée de minéraux détritiques comme la calcite, l'aragonite, la dolomite, les smectoïdes, les micas, la kaolinite et la chlorite se traduisant chimiquement par la dominance de Ca, Mg, Al, Fe, Sr, K, Na, SiO₂ et PO₄. Tous les minéraux sont issus, de l'érosion des formations constituant le bassin versant ; une partie de ces minéraux pourrait être d'origine éolienne. Cette caractérisation rejoint les observations sédimentologiques et témoigne de l'absence de continuité dans la mise en place des 28 mètres de sédiment ; il y a au moins trois stades de mise en place de ces dépôts lacustres dans lesquelles il peut y avoir des lacunes de sédimentation en raison de la position du forage en bordure de la zone profonde. Ce forage suggère un taux de sédimentation élevé, comparable à ceux observés à la même période dans d'autres sites du Jura, du Plateau suisse... Tous les indices soulignent indirectement un climat rude (sans végétation) dans lequel le facteur hydrique (érosion du bassin versant) a dû jouer un rôle important.

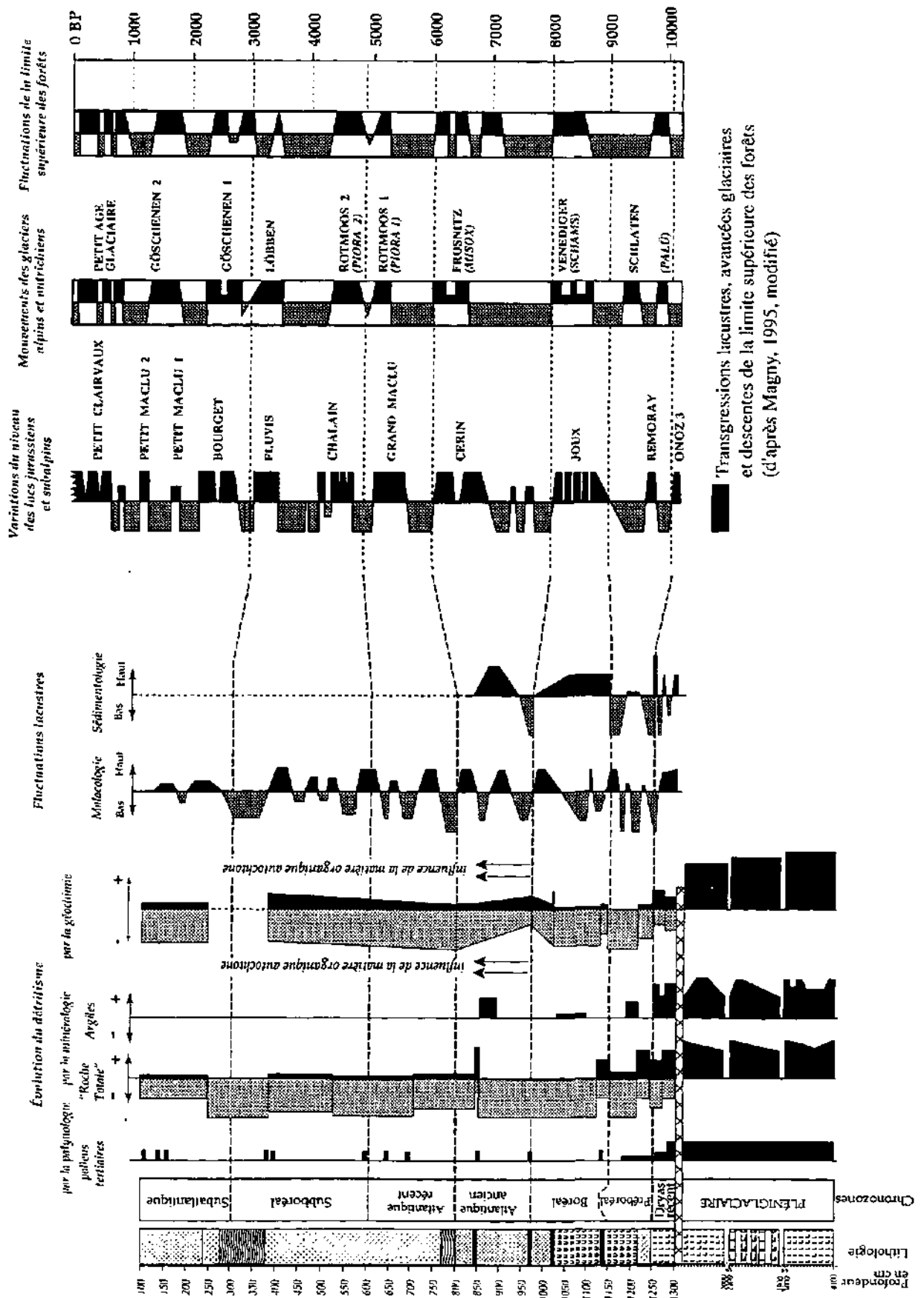


Figure 3.1 : Essai de corrélation entre les données de la palynologie, de la minéralogie, de la géochimie, de la malacologie, de la sédimentologie du Marais du Col-des-Roches avec les données climatiques régionales et extra régionales

Le Dryas récent (11 000 BP soit entre environ 11066 et 10862 cal. BC et 10 000 BP entre environ 9798 et 9056 cal. BC)

Au Locle, les forages ne permettent pas de suivre l'évolution de la végétation de la totalité du Tardiglaciaire, seule une partie du Dryas récent est bien marquée. Les données de la minéralogie et de la géochimie ne mettent pas clairement en évidence cet important hiatus sédimentaire qui peut s'expliquer par l'emplacement du forage à proximité d'un talus formé par les irrégularités du substratum.

A la fin du Dryas récent, la végétation arborée est dominée par le pin, le genévrier et le bouleau. Le tapis herbacé est constitué principalement d'armoises, de poacées et de plantes héliophiles caractéristiques des milieux très ouverts. Deux étapes peuvent être individualisées en palynologie, minéralogie et géochimie (figure 3.1 et 3.2) :

- la première, entre 1290 et 1260 cm, montre une hausse des pourcentages du bouleau, du genévrier et du pin. Le taux des minéraux détritiques (quartz, phyllosilicates, dolomite) diminuent parallèlement à la hausse du taux de calcite dont une part est d'origine autochtone. La distribution des éléments chimiques majeurs corrobore parfaitement la répartition minéralogique ; les éléments liés aux silico-clastiques d'origine détritique (Mg, Si, Na, K, Fe, Mn et PO_4) régressent alors qu'une hausse des éléments liés aux minéraux autochtones (Ca et Sr) est observée. La fraction inférieure à 2 μm montre une chute progressive des intensités brutes des smectoïdes et de la kaolinite ; le quartz augmente brusquement. Les intensités brutes des minéraux de la fraction 2-16 μm décroissent. Cette partie est le reflet d'une diminution relative du détritisme.

- la seconde, entre 1260 et 1240 cm, indique une diminution des pourcentages du pin, du bouleau et du genévrier, mais ceux des cypéracées et des apiacées augmentent. La diffraction du sédiment total montre que des minéraux détritiques (dolomite et quartz) augmentent et qu'une hausse des intensités de la pyrite et des feldspaths associée à une baisse des intensités des smectoïdes et des micas est observée dans les fractions inférieures à 2 μm . La fraction 2-16 μm montre très clairement une récurrence des intensités de tous les minéraux. La géochimie corrobore ce résultat : une diminution des éléments liés à la phase carbonatée autochtone au détriment d'une recrudescence des éléments liés aux minéraux détritiques (Mg, Si, PO_4) est mise en évidence. Ces modifications palynologiques, minéralogiques et géochimiques montrent, pour cette partie du Dryas récent, l'existence d'un épisode plus déritique.

Partant de l'hypothèse que seule la partie supérieure du Dryas récent est représentée au Locle (d'après la palynologie), on peut dire que la première partie de la fin de cette période correspond à une phase d'amélioration climatique temporaire. Celle-ci se traduit par l'installation d'arbres et d'arbustes dans un environnement proche du site ; la présence de cette couverture végétale constituée par des essences pionnières, provoque une baisse importante des apports détritiques qui s'exprime par une diminution de tous les minéraux (à l'exception de la calcite) dont on a vu qu'ils proviennent principalement du bassin versant. Les résultats de la paléohydrologie montrent que le lac subi, à cette période, des variations importantes de son niveau qui tend à régresser globalement (figure 3.2).

La seconde étape de cette partie du Dryas récent correspondrait plutôt à une période de dégradation du climat. Le reflet de cette évolution du climat est marqué par une

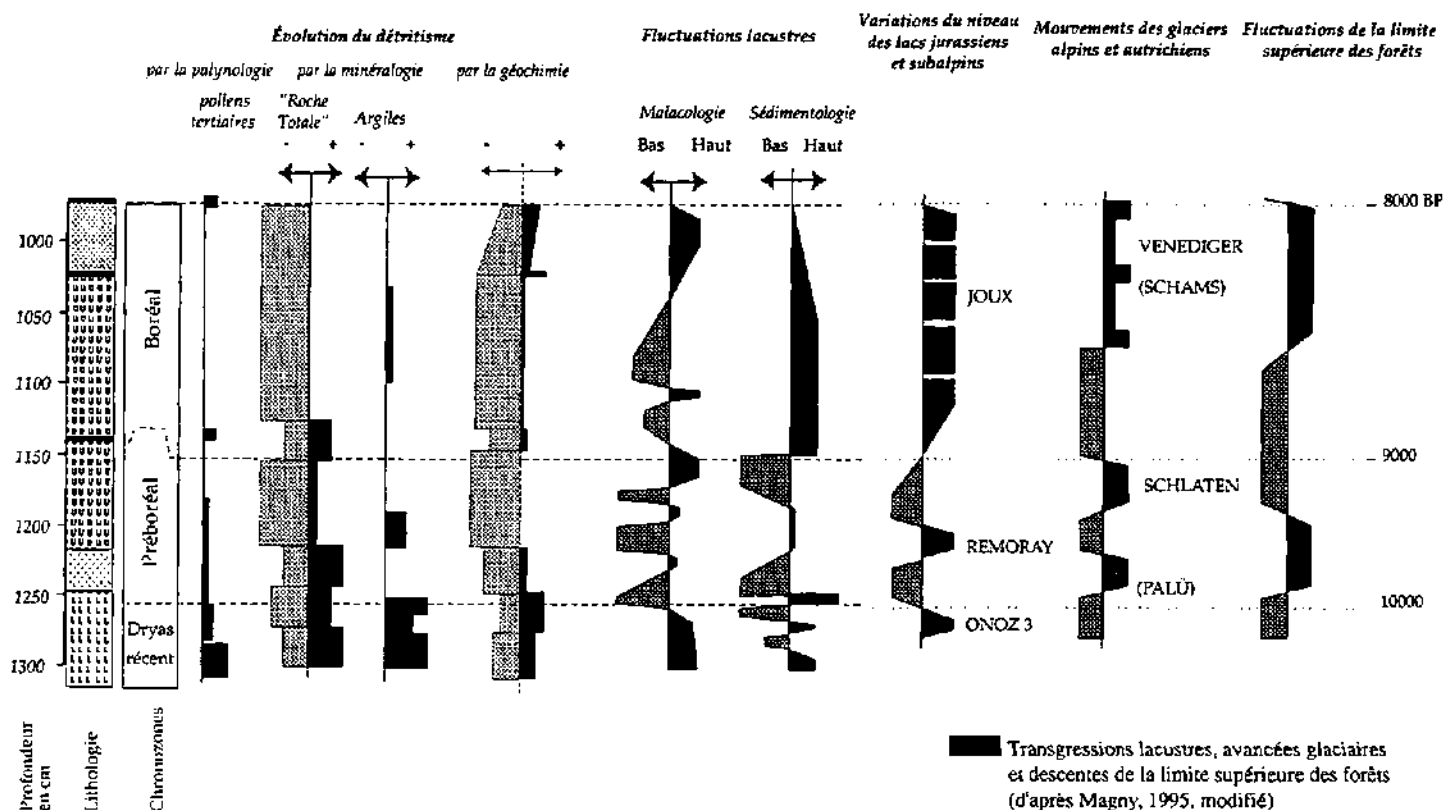


Figure 3.2 : Essai de corrélation entre les données de la palynologie, de la minéralogie, de la géochimie, de la malacologie, de la sédimentologie et avec les données climatiques régionales, détail du Dryas récent et du début de l'Holocène

diminution des pourcentages d'arbres et une augmentation de ceux des herbacées. Cette modification de la végétation est extrêmement bien perçue dans le sédiment. Parallèlement, on observe, dans les fractions argileuses principalement, une augmentation de tous les minéraux détritiques hérités du bassin versant. Ces apports sont moins importants que ceux qui se sont déroulés lors des apports contemporains de la déglaciation sur ce site. La hausse du taux des cypéracées et la tendance régressive du niveau lacustre se font écho. Cette corrélation suggère une diminution des précipitations, mais avec une reprise d'érosion du bassin versant. Cette période de déficit hydrique a été soulignée par Magny et Ruffaldi (1995). Actuellement, des datations ^{14}C sont en cours pour fixer précisément de manière absolue ces deux phases du Dryas récent. Ces résultats s'intègrent donc bien aux données paléoclimatiques plus globales, ils montrent en outre la complexité des signatures indirectes de cette dégradation climatique sur ce site ; ils rejoignent également ce que Bichet (1997) montre à Chaillexon. Les causes du refroidissement brutal du Dryas récent ne sont pas encore clairement établies (Broecker et al., 1988 ; Wright, 1989 ; Grimm et al., 1993 ; Dansgaard et al., 1993 ; Mayeski et al., 1993 ; Mayeski et al., 1994 ; Strömberg, 1994). Une des causes probables de ce refroidissement est une modification importante des contrastes saisonniers. L'atmosphère, sensible à ces contrastes, détermine fortement la circulation océanique et, notamment, modifie la répartition de la salinité des eaux marines (Broecker et al., 1988 ; Broecker, Denton, 1990 ; Magny, 1995). Ce sont les modifications des paramètres qui régissent cette circulation thermohaline (température des eaux de surface, salinité, évaporation, apports d'eau douce dus à la fonte des calottes de glace...) qui ont contribué à ce refroidissement global. Guiot et al., (1988) montrent, grâce aux fonctions de transfert, une chute des températures estivales et hivernales de 5 à 8 °C liée à une baisse des précipitations.

Le Préboréal (env. 10 000 BP soit entre environ 9798 et 9056 cal. BC et 9000 BP soit entre environ 8053 et 7977 cal. BC)

Le Préboréal est caractérisé par l'abondance du pollen de pin suggérant la présence de véritables pineraies relativement proches du site. Toutefois, les premiers pollens de feuillus (bouleau et noisetier) témoignent du développement de ces taxons à plus basse altitude. La composition minéralogique et géochimique du sédiment, comme la végétation, changent radicalement de celle du Dryas récent. Une tripartition est visible dans cette période (figures 3.1 et 3.2).

- La première partie du Préboréal (entre 1240 et 1215 cm) se caractérise sédimentologiquement par un niveau de gyttja contenant moins de calcite, plus de quartz et d'aragonite que pendant le Dryas récent. Les fractions fines montrent une nette augmentation des intensités des minéraux détritiques (quartz et pyrite de la fraction $< 2 \mu\text{m}$; micas et minéraux en grains de la fraction $2-16 \mu\text{m}$). Chimiquement, cette variation minéralogique s'exprime par une diminution de Ca et Mg (liés aux carbonates autochtones) au profit d'une hausse de Sr, Na, K, PO_4 (provenant des minéraux détritiques). Parallèlement, on observe le développement maximal du pin et une diminution du bouleau sur le site ; les pollens tertiaires sont moins abondants. Les résultats de la paléohydrologie révèlent un fort abaissement du niveau du lac.

- la seconde partie du Préboréal (entre 1215 et 1190 cm) se caractérise par une diminution des pourcentages de pin et une augmentation de ceux du bouleau ; le noisetier est repéré en courbe continue. Les signatures minéralogiques exprimant un régime détritique diminuent. Le taux de calcite est en constante augmentation. La géochimie corrobore cette observation : un retour marqué du calcium associé à une chute de Mg et de tous les éléments liés aux minéraux détritiques ; c'est véritablement le début de la sédimentation authigénique holocène au Locle. Le niveau du lac est, d'après la malacologie et la sédimentologie, transgressif. La sédimentation carbonatée autochtone masque les apports allochtones.

- La troisième partie du Préboréal (entre 1190 et 1160 cm) correspond à de nouveaux changements dans la couverture végétale. On assiste à une hausse progressive des pourcentages du noisetier, de l'orme, du chêne et une diminution des taux de bouleau. La fin du Préboréal est caractérisée minéralogiquement par une recrudescence des intensités brutes des argiles des fractions inférieures à $2 \mu\text{m}$ essentiellement. La géochimie montre dans cette partie une hausse de tous les éléments détritiques ; leur apparition a débuté progressivement dans la craie lacustre. L'étude paléohydrologique donne des informations contradictoires mais tout porte à croire que le niveau du lac est régressif.

La tripartition du Préboréal, sur le site du Locle, se caractérise minéralogiquement par deux épisodes (l'un entre 1240 et 1215 cm ; l'autre entre 1190 et 1160 cm) dans lesquels le détritisme est bien marqué dans les fractions argileuses uniquement. Un épisode intermédiaire (entre 1215 et 1190 cm) correspond véritablement au début de la sédimentation carbonatée autochtone où le détritisme y est réduit, il est en fait moins bien représenté à cause de la production autochtone. On remarque que le détritisme minéralogique et chimique est plus marqué dans les phases de bas niveaux du lac (les gyttjas et le niveau de craie qui se charge en matière organique). Les craies lacustres de cette période ne montrent pas de variation de leur composition chimique. Les essences formant le couvert arboré

changent au cours du Préboréal : les pineraies sont lentement envahies par les premiers noisetiers soulignant ainsi une amélioration générale du climat qui est, comme le montre la minéralogie, discontinue pour le Préboréal. Ruddiman et Mc Intyre, 1981 ; Atkinson et al., 1987 ; Magny, 1995 ; Bichet, 1997 montrent que la transition brutale Dryas récent/Préboréal observée dans différents sites à une origine climatique. Le réchauffement rapide du début du Préboréal serait lié à une variation de l'orbite solaire et à une hausse de l'insolation estivale à laquelle s'ajoute une diminution des précipitations (Guiot et al., 1988). Les signatures palynologiques, minéralogiques et géochimiques que nous proposons ici se corréleront avec les résultats de Magny et Ruffaldi (1995), Richard, (1996) et Bichet, (1997).

La phase transgressive du Locle qui interrompt les bas niveaux qui caractérisent le Préboréal est synchrone de l'épisode de hautes eaux reconnu dans les lacs de St Point et de Remoray pendant le Préboréal entre 9700 et 9450 BP (Magny, Ruffaldi, 1995). Cette période transgressive peut être corrélée avec une avancée des glaciers suisses (phase de Palü) et autrichiens (phase de Schlaten) (Magny, Ruffaldi, 1995) et avec un recul de la limite supérieure des forêts dans les Alpes suisses (Burga, 1988). Ces événements sont également connus sous le nom de "P- oscillation" dans les lacs du Plateau suisse vers 9500 BP (Lotter et al., 1992 a, b). Les résultats de la minéralogie et de la géochimie de la deuxième phase du Préboréal ne permettent pas d'établir un parallélisme avec cet épisode de dégradation climatique. Des datations radiocarbone sont actuellement en cours pour caler les trois périodes identifiées au Locle pendant le Préboréal.

Le Boréal (env. 9000 BP soit entre environ 8053 et 7977 cal. BC et 8000 BP soit entre environ 7053 et 6725 cal. BC)

Le diagramme pollinique montre une diminution des pollens de pin au profit de celui du noisetier qui caractérise le Boréal. L'essor de cette essence au feuillage caduc traduit véritablement les premières améliorations climatiques autour du site. Parallèlement, d'autres essences progressent au niveau régional ; ce sont les ormes, les chênes, puis, plus tardivement, le tilleul. Cette chronozone est scindée en trois zones polliniques locales. Cette tripartition apparaît également en minéralogie et en géochimie (figures 3.1 et 3.2):

- la première partie (entre 1160 et 1135 cm) contient le niveau organique à 1137 cm daté de 9750 ± 80 BP. La date a été rejetée car elle apparaît vieillie d'après les zones polliniques locales et régionales. La quantité de pollens tertiaires et de minéraux détritiques provenant du bassin versant est en progression dans ce niveau. Les résultats malacologiques et sédimentologiques se contredisent. La malacologie, à la différence de la sédimentologie, reflète très bien l'intercalation organique qui correspond à un bas niveau du lac.

- la seconde partie du Boréal (entre 1135 et 1045 cm) est enregistrée dans la craie lacustre. La minéralogie des fractions fines met en évidence, entre 1090 et 1030 cm de profondeur, une phase où les minéraux détritiques (argiles, minéraux en grains : la pyrite) sont en légère hausse alors que rien n'est visible dans le sédiment total. Des hausses peu importantes de K, PO_4 , Fe, Si permettent de souligner cet épisode détritique par la géochimie. La végétation de cette période, plus thermophile, montre une régression de l'orme, du chêne et du noisetier ; le pin est en augmentation. Sur le site du Locle, ces observations vont dans le sens d'un éclaircissement de la forêt accompagné d'une

dégradation climatique peu marquée située vers le milieu du Boréal. Les populations de mollusques traduisent un bas niveau des eaux du lac alors que les concrétions carbonatées indiquent plutôt un haut niveau. La fin de cet épisode est daté de 9120 ± 75 BP ; la date est rejetée car elle n'est pas en accord avec les données polliniques régionales.

- la troisième partie du Boréal (entre 1045 et 975 cm) coïncide avec le début des craies organiques qui, minéralogiquement, sont peu différentes des craies lacustres sous-jacentes. En revanche, la géochimie souligne très bien l'accumulation progressive de matière organique dans ces craies. Un retour très net de la silice, de l'aluminium, du potassium, du fer et des orthophosphates, associé à une diminution du calcium et du strontium, est observé. Dès lors, les éléments Al, Fe, K, Na, Si peuvent avoir deux origines : l'une allochtone et l'autre autochtone (matière organique). La variation chimique est, dès cette période, beaucoup plus le reflet des changements sédimentaires que celui des variations des apports allochtones.

On peut observer que cette phase détritique se développe, au Locle, pendant un épisode transgressif mis en évidence par la sédimentologie au cours du Boréal. Cet épisode apparaît synchrone de la phase transgressive que de nombreux lacs du Jura et des Alpes du Nord subissent à cette même période et qui est connue sous le nom de phase de Joux (Magny, 1991 ; 1995). Cet auteur a également observé que cette hausse du niveau des lac coïncide avec une avancée des glaciers suisses et autrichiens (Venedigger et Schams) parallèlement à un recul de la limite forestière en altitude. Le synchronisme qui apparaît entre ces résultats indépendants permet de supposer que seule une dégradation du climat puisse être à l'origine de tels changements.

L'Atlantique ancien (env. 8000 BP soit entre environ 7053 et 6725 cal. BC et 6000 BP soit entre environ 4921 et 4842 cal. BC et l'Atlantique récent (env. 6000 et 4700 BP soit entre environ 3511 et 3376 cal. BC)

Au Locle, pendant l'Atlantique ancien, la chênaie mixte atteint son plein essor. Le frêne et l'érable montrent leur développement maximal. L'optimum de *Fraxinus* est très bien calé chronologiquement, il débute vers 7210 ± 85 BP soit [6183 (6008) 5869] cal. BC et s'achève vers 6280 ± 65 BP soit [5329 (5246) 5062] cal. BC. Cette dernière date correspond à la fin de l'Atlantique ancien sur le site du Locle. Les limites chronologiques de l'Atlantique récent ont été placées à 6280 ± 65 BP soit [5329 (5246) 5062] cal. BC et à 5125 ± 65 BP soit [4040 (3956) 3779] cal. BC. Dans ce dernier intervalle, on assiste à l'installation et au développement du sapin, du hêtre et de l'aulne. En revanche, le frêne, l'orme et le tilleul régressent. C'est dans ce cadre environnemental que les premières traces d'une activité humaine sur ce site sont véritablement reconnues. L'Atlantique n'est pas aussi documenté minéralogiquement et chimiquement que les périodes précédentes (figure 3.1).

L'Atlantique ancien (entre 980 et 790 cm) est enregistré dans de la craie lacustre organique contenant encore beaucoup de calcite et d'aragonite mais où la pyrite fait son apparition dans le sédiment total (forage LLC1) ; l'Atlantique ancien est enregistré dans de la tourbe dans le forage LLC2. Un retour bien marqué de la dolomite, du quartz et des phyllosilicates est observé ; ces minéraux soulignent un retour très important des apports du

bassin versant dès 7210 ± 85 BP. La perception de ce détritisme était déjà possible à travers la présence de pollens tertiaires à la fin du Boréal. Les fractions fines nous renseignent très bien sur le passage progressif entre les craies lacustres organiques et les gyttjas. Ce passage est perceptible dès 890 cm alors qu'il n'est visible qu'à partir de 850 cm avec le sédiment total.

L'Atlantique récent (entre 790 et 620 cm) est enregistré dans de la gyttja dont le taux de calcite est en nette diminution. La présence de l'homme est incontestable dès 6280 ± 65 BP. L'attribution des apports détritiques exclusivement à une dégradation du climat n'est pas concevable pour cette période en raison de la présence d'indices polliniques d'anthropisation.

La géochimie montre que les éléments attachés partiellement aux silico-clastiques et à la matière organique sont présents même lorsqu'une hausse des taux de calcium et de strontium sont relevés. L'Atlantique est, au Locle, trop influencé par les changements rapides de faciès sédimentaires pour y observer les variations d'un paramètre géochimique qui soit indépendant de la variation de la composition de ces faciès. En effet, les gyttjas et les tourbes peuvent montrer des taux de silice, de fer, de potassium et d'orthophosphates aussi élevés que dans les argiles silteuses grises du Pléniglaciaire.

La malacologie et la sédimentologie mettent en évidence deux phases de haut niveau du lac interrompues par un bas niveau à 845 cm daté à 7210 ± 85 BP soit [6183 (6008) 5869] cal. BC. Le second épisode transgressif se termine vers 6280 ± 65 BP soit [5329 (5246) 5062] cal. BC. Ces deux phases de haut niveau correspondent à la phase transgressive et bipartite de "Cerin" qui est datée entre 6800-6100 BP et 6100-5700 BP (Magny, 1992). Cette transgression a été mise en parallèle avec la phase d'avancée glaciaire de Frosnitz dans les Alpes autrichiennes (ou Misox dans les Alpes suisses) qui est identifiée à la fin de l'Atlantique ancien. Le parallélisme étroit entre les résultats de ces différentes approches suggère un déterminisme climatique.

Le Subboréal (env. 4700 BP soit entre environ 3511 et 3376 cal. BC et 2700 BP soit entre environ 841 et 815 cal. BC.)

Au Locle, le Subboréal est calé par le radiocarbone entre 5125 ± 65 BP [4040 (3956) 3779] cal. BC et 2525 ± 55 BP [805 (767) 409] cal. BC. Il est caractérisé par l'essor de la hêtraie-sapinière et de l'épicéa. Sur le site d'Ilay, le Subboréal est partiellement représenté ; le hêtre, le sapin et l'aulne y jouent un rôle plus important dans la végétation. Au Locle, les changements rapides de faciès sédimentaires et la présence croissante de tourbe ne permet pas d'observer une variation d'un paramètre géochimique indépendant de la présence de matière organique. En revanche, les craies lacustres du forage d'Ilay ont été retenues pour satisfaire la recherche de marqueurs minéralogiques et géochimiques comparables à ceux du Locle, mais pour des périodes plus récentes (figures 3.1 et 3.3).

Cette chronozone (entre 620 et 290 cm) apparaît complète au Locle ; elle est partielle à Ilay (entre -170 et -112 cm). A l'opposé, au Locle, la présence continue de minéraux détritiques et de pollens tertiaires provenant du bassin versant est observée. Ces apports plus ou moins continus de matériel déritique sont liés à une érosion quasi permanente du bassin versant pendant tout le Subboréal. Cette érosion peut être soit d'origine anthropique, soit d'origine climatique ; elle peut également être une combinaison des deux.

Synthèse

A Ilay, les variations du taux d'aragonite peuvent être partiellement corrélées à l'effectif des gastéropodes. La fin du Subboréal est caractérisée par une diminution régulière du taux d'orthophosphates. Cette diminution se déroule parallèlement à des variations du $\delta^{18}\text{O}$ qui sont plus négatives, lesquelles sont brusquement interrompues par un gradient moins négatif. Ces valeurs moins négatives rendent compte d'une diminution temporaire du niveau lacustre à l'intérieur d'une phase de hautes eaux enregistrée vers la fin du Subboréal (Magny et al., 1995 ; Filippi, 1996).

Le Subatlantique (env 2700 BP soit entre environ 841 et 815 cal. BC à l'actuel

Le début du Subatlantique est daté par le ^{14}C au Locle de 2525 ± 55 BP soit [805 (767) 409] cal. BC mais il n'y est pas enregistré en totalité ; il se termine vers 1745 ± 50 BP soit [147 (175, 197) 419] AD. Il est, en revanche relativement détaillé à Ilay (figures 3.1 et 3.3). La végétation du Subatlantique est caractérisée dans les deux sites par la prédominance de la hêtraie-sapinière et l'apparition du charme et du noyer. Les diagrammes polliniques d'anthropisation montrent que l'impact de l'homme sur la végétation a été continu depuis le Subboréal. Au Locle, cet impact est discontinu mais les phases d'activité sont d'intensité croissante du Subboréal au Subatlantique. A Ilay, on a pu remarquer une continuité dans l'activité humaine sans véritable intensification au Subatlantique comme on le voit souvent sur les diagrammes rencontrés dans la littérature (Gauthier, 1996).

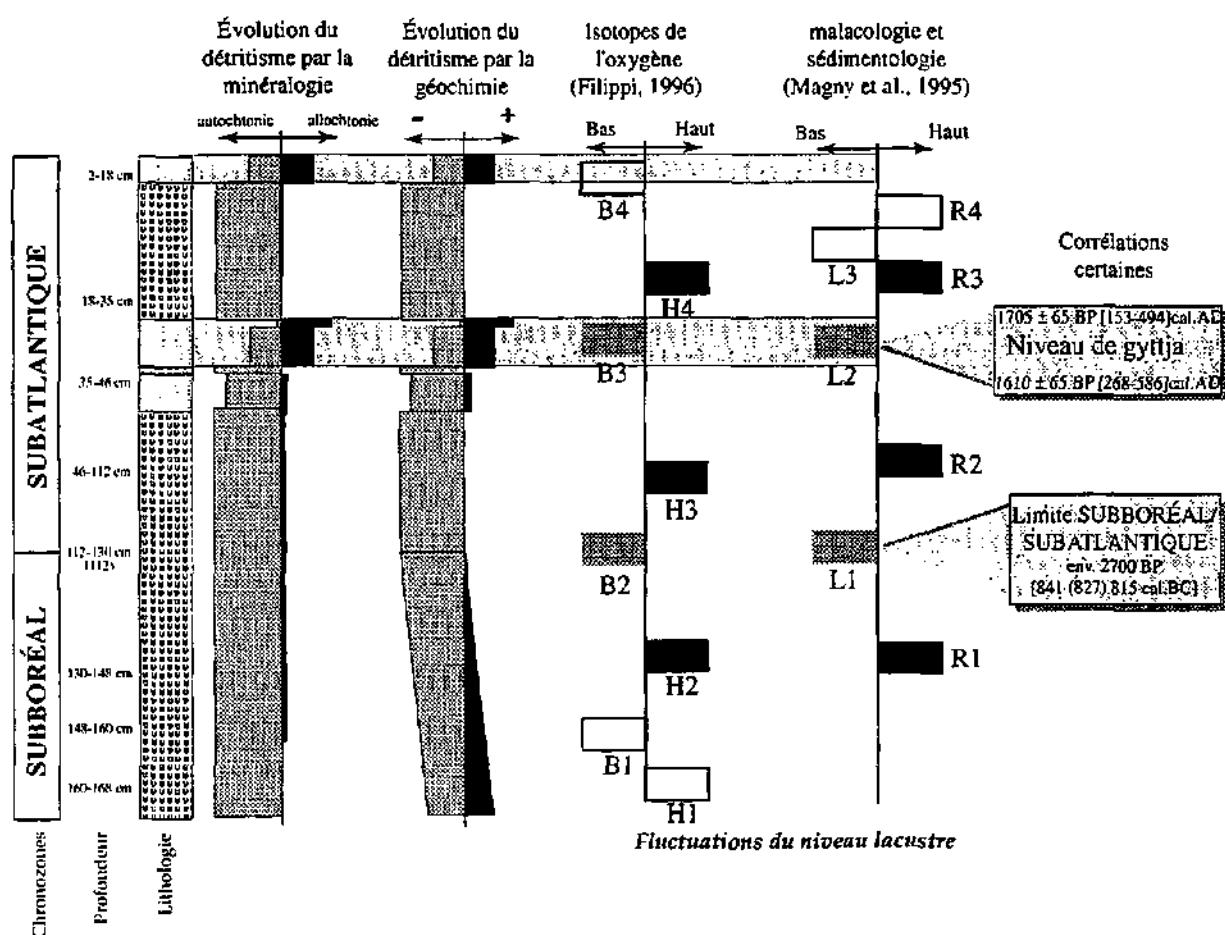


Figure 3.3 : Essai de corrélation entre les données de la palynologie, de la minéralogie, de la géochimie, de la malacologie, de la sédimentologie du lac d'ILAY avec les données climatiques régionales

Au Locle, la minéralogie et la géochimie ne montrent pas de différences avec le Subboréal.

A Ilay, bien que le Subatlantique soit mieux documenté, on observe une variation minéralogique marquée dans les niveaux de gyttjas (entre -37 et -49 cm et entre -7 et 0 cm). Les éléments majeurs ne montrent aucune variation entre le début du Subatlantique (vers 2700 BP) et le début des gyttjas daté vers 1610 ± 65 BP soit [268 - 586] cal. AD. La spéciation des carbonates souligne très bien, comme la minéralogie, la malacologie et la sédimentologie, le changement de sédimentation correspondant à la gyttja. Ce faciès est daté entre 1610 ± 65 BP soit [268 - 586] cal. AD et 1705 ± 65 BP soit [153 - 494] cal. AD. D'après Magny et al., (1995) et Filippi (1996), ces niveaux correspondent à des phases d'abaissement du niveau lacustre dont l'origine climatique est certaine. La palynologie et la minéralogie ne sont pas suffisantes pour mettre en évidence des fluctuations climatiques de manière certaine dès que l'impact humain devient trop important, son action sur la végétation (et donc sur la pluie pollinique) masque les effets du climat.

- Entre 586 et 1394 cal. AD (date dendrochronologique vers 20 cm in Magny et al., (1995), la sédimentation est à nouveau carbonatée, mais ne montre plus chimiquement de tendance significative.

La période correspondant au Petit Age Glaciaire et à l'actuel se situe, à Ilay, entre 20 et 0 cm ; il s'agit d'une des raisons de l'impossibilité de mettre en évidence le PAG. La palynologie, ne permet pas de reconnaître le PAG. Cette difficulté a déjà été signalée au Loclat par Hadorn (1992) et dans le lac de Neuchâtel (Hadorn in Schwalb, 1992). La difficulté réside dans l'impossibilité de distinguer l'influence anthropique de celle du climat. La minéralogie et la géochimie montrent surtout l'évolution de la sédimentation des craies lacustres vers une gyttja. Les isotopes du carbone et de l'oxygène confirment cette tendance vers un abaissement du niveau lacustre.

Le Petit Age Glaciaire est une période pendant laquelle il y a un abaissement des températures moyennes de 1.5°C associé à une hausse de l'écart entre les températures extrêmes. Le PAG succède à une période chaude : le Petit Optimum Médiéval ou encore Petit Optimum Climatique qui s'est étalé du 9^{ème} au 14^{ème} siècle AD (Schneider, 1994). L'identification du PAG a été faite à partir de l'avancée des glaciers en Europe et dans les montagnes du Nord Ouest américain. Le PAG a débuté, selon les auteurs, soit vers 1300 AD soit au 16^{ème} siècle et a duré jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle (Le Roy Ladurie, 1983 ; Grove, 1988 ; Bradley, Jones, 1991 ; Mikami, 1992 ; Evans et al., 1994 ; Fritz et al., 1994 ; Pfister et al., 1994). La répartition géographique de ce refroidissement n'est pas encore connue en raison du petit nombre de longues séries de données historiques et du faible nombre d'enregistrements paléocéologiques. Tout porte à croire, que ce refroidissement, est enregistré sous diverses formes et parfois avec certains décalages chronologiques, dans de nombreuses régions du globe autour cette période allant du 16^{ème} au 19^{ème} (Bradley, Jones, 1991 ; Mikami, 1992). Toutefois, le PAG correspond à une succession de périodes froides : Oort, Wolf, Sporer, Maunder et Dalton alternant avec de courts épisodes de réchauffement. Les périodes froides du PAG (exemple minimum de Maunder (1645- 1715 AD, Pfister et al., 1994) coïncident avec des baisses de l'activité solaire (Bray, 1968 ; Grove, 1988) et à des maxima positif du $\delta^{14}\text{C}$ dans l'atmosphère (Stuiver, Pearson, 1986).

Synthèse et conclusions

Comme nous pouvions le présupposer cette étude confirme que les deux périodes de dégradation climatique que sont le Dryas récent et le Petit Age Glaciaire n'ont pas de points communs en raison des différences de durée et d'intensité. Au Locle, les analyses palynologiques, minéralogiques et géochimiques montrent que la signature paléoclimatique du Dryas récent est clairement identifiable dans le remplissage lacustre, bien qu'une partie seulement de cette période soit enregistrée. Ce travail enseigne d'autre part que ce sont dans les dépôts sédimentaires lacustres carbonatés d'origine autocbtone que les signatures paléoclimatiques doivent être recherchées à partir des analyses que nous avons mis en oeuvre. En revanche, dans les sédiments contenant de la matière organique, les analyses minéralogiques et géochimiques n'apparaissent pas adaptées à la mise en évidence d'un marqueur particulier lié au climat. Ces disciplines sont appropriées pour caractériser la composition des faciès sédimentaires. De ce point de vue, cette étude montre très clairement que l'exploitation des données palynologiques, minéralogiques et géochimiques propres aux sédiments piégés dans une cuvette lacustre ne peut être dissociée de l'analyse des formations du bassin versant à l'origine de cette production sédimentaire.

Malgré les difficultés rencontrées lors de la réalisation de ce travail liées à l'ambition des objectifs, il nous apparaît nécessaire d'effectuer des travaux supplémentaires sur le site du Col-des-Roches qui nous a révélé des potentialités certaines.



Références Bibliographiques



La fontaine monumentale de la place du Marché érigée en 1837 par une société privée. Elle fût alimentée, à l'origine, par les sources de la Grecque, Musée d'histoire du Locle, in Burger, Schaer (1996).

Références bibliographiques

- ADATTE T. et RUMLEY G. 1984. Microfaciès, micropaléontologie, minéralogie, stratigraphie et évolution des milieux de dépôts de la plate-forme berriasio-valanginienne des régions de St-Croix, Cressier et du Landeron (NE). *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 107, 221-239.
- ADATTE T. 1988. *Etude sédimentologique, minéralogique, micropaléontologique et stratigraphique du Berriasien-Valanginien du Jura central*. Neuchâtel : Faculté des Sciences, Institut de Géologie, Thèse, 481 p.
- ADATTE T., RENTZEL P. et KÜBLER B. 1991. Étude minéralogique et sédimentologique du remplissage karstique de la grotte de Cotencher (Jura neuchâtelois, Suisse). *Eclog. Geol. Helv.*, 84, 3, 671-688.
- AGASSIZ L. 1843. Sur les anciens glaciers du Jura. *Actes Soc. Helv. Sci. Nat.*, 28^{ème} session, 284-285.
- ALLEN H. E. et KRAMER J. R. 1972. *Nutrients in natural waters*. 457 p.
- AMMANN B., CHAIX L., EICHER U., ELIAS S. A., GAILLARD M. J., HOFMAN W., SIEGENTHALER U., TOBOLSKI K. et WILKINSON B. 1983. Vegetation, insects, molluscs and stable isotopes from Würm deposits at Lobsigensee (Swiss Plateau), Studies in the Late Quaternary of Lobsigensee 7. *Rev. Paléobio.*, 2, 2, 221-227.
- AMMANN B. 1985. Lobsigensee - Late-Glacial and Holocene environments of a lake on the Central Swiss Plateau. *Diss. Bot.*, 87, 127-134.
- AMMANN B. 1989 a. Late-Quaternary Palynology at Lobsigensee: Regional Vegetation History and Local Lake Development. Berlin, Stuttgart: J. CRAMER (Diss. Bot., n°137), 157 p.
- AMMANN B. 1989 b. Response times in bio- and isotope-stratigraphies to Late-Glacial climatic shifts - an example from lake deposits. *Eclog. Geol. Helv.*, 82, 1, 183-190.
- AMMANN B. 1989 c. Periods of rapid environmental change around 12 500 and 10 000 years BP, as recorded in Swiss lake deposits. *J. Paleolimnol.*, 1, 269-277.
- AMMANN B. et LOTTER A. F. 1989. Late-glacial radiocarbon- and palynostratigraphy on the Swiss Plateau. *Boreas*, 18, 109-126.
- ANDRIEU V. 1989. La série glaciolacustre de Barbazan. in : "Glaciaire pyrénéen versant nord/versant sud", livret-guide de l'excursion de l'association Française pour l'étude du Quaternaire (AFEQ), 4-7 Mai, 36-45.
- ANDRIEU V. 1991. *Dynamique du paléoenvironnement de la vallée montagnarde de la Garonne (Pyrénées Centrales, France) de la fin des temps glaciaires à l'actuel*. Université de Toulouse II, Thèse, 330 p.
- ANDRIEU V., EICHER U. et REILLE M. 1993. La fin du dernier Pléniglaciaire dans les Pyrénées (France) : données polliniques, isotopiques et radiométriques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 316, II, 245-250.
- ARUSCAVAGE P. J. et CROCK J. G. 1987. Atomic Absorption Methods. In: Philip A. Baedecker. *Methods for chemical analysis* (U. S. Geological Survey Bulletin, 1770). Denver: Department of the Interior, 1-6.
- ATKINSON T. C., BRIFFA K. C. et COOPE G. R. 1987. Seasonal temperatures in Britain during the past 22,000 years, reconstructed using beetle remains. *Nature*, 325, 587-592.
- AUBERT D. 1965. Calotte glaciaire et morphologie jurassienne. *Eclog. Geol. Helv.*, 58, 1, 555-574.
- AVNIMELECH Y. 1983. Phosphorus and carbonate solubilities in Lake Kinneret. *Limn. Oceanogr.*, 28, 640-645.
- BAEDECKER P. 1987. *Methods for geochemical analysis*. Denver: Department of the Interior, Donald P. Hodel (U. S. Geological Survey Bulletin, n°1170), 123 p.
- BAPST A. 1987. *Le Lac de Neuchâtel : Physico-chimie et Turbidimétrie des eaux. Concentration, Minéralogie et Granulométrie des particules en suspension*. Neuchâtel : Université de Neuchâtel, Faculté des Sciences, Institut de Géologie, Thèse, 101 p.
- BASTIN B. et COÛTEAUX M. 1966. Application de la méthode de Frenzel à l'extraction des pollens de sédiments archéologiques pauvres. *L'Anthropologie*, 70, 1-2, 201-203.
- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1983. Paléoenvironnement tardiglaciaire et holocène des lacs de Palléautier et Siguret (Hautes-Alpes, France). 1. Histoire de la végétation d'après les analyses polliniques. *Ecol. Méd.*, IX, 3-4, 20-36.
- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1984 a. A long Upper Pleistocene pollen record from "les Échets", near Lyon, France. *Boreas*, 13, 111-132.
- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1984 b. The pollen sequence of "les Échets" (France): a new element for the chronology of the upper Pleistocene. *Géogr. Phys. Quat.*, XXXVIII, 1, 3-9.
- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1985 a. L'intérêt paléocologique du remplissage sédimentaire des maars du Velay occidental. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 301, II, 6, 443-448.

Références

- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1985 b. The problem of abrupt climatic changes in the Würm Pleniglacial: the exemple of les Échets (France). *S. I. O. Ref. Ser.*, 86, 8, 102-103.
- BEAULIEU de J.-L. et GOEURY C. 1987. Zonation automatique appliquée à l'analyse pollinique : Exemple de la Narse d'Ampoix (Puy de Dôme, France). *Bull. A. F. E. Q.*, 1, 49-61.
- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1989. The transition from temperature phases to stadials in the long upper Pleistocene sequence from "les Échets" (France). *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleocol.*, 72, 147-159.
- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1992 a. The last climatic cycle at "la Grande Pile" (Vosges, France). A new pollen profile. *Quart. Sci. Rev.*, 11, 431-438.
- BEAULIEU de J.-L. et REILLE M. 1992 b. Long Pleistocene pollen sequence from the Velay Plateau (Massif Central, France). *Veget. Hist. Archeobot.*, 1, 233-242.
- BEAULIEU de J.-L., RICHARD H., RUFFALDI P. et CLERC J. 1994. History of vegetation, climate and human action in the French Alps and the Jura over the last 15 000 years. *Diss. Bot.*, 234, 253-275.
- BECK C. 1987. *Etude des composés humiques et essais de caractérisation de la matière organique dans les sédiments récents (post-glaciaires) du lac de Neuchâtel*. Neuchâtel : Faculté des Sciences, Université de Neuchâtel, Thèse, 105 p.
- BEHRE K. E. 1981. The interpretation of anthropogenic indicators in pollens diagrams. *Pollen et Spores*, XXIII, 2, 225-245.
- BENZÉCRI J.-P. 1973. *L'analyse des données, l'analyse des correspondances*. Dunod, Paris. 126 p.
- BENZÉCRI J.-P. et BENZÉCRI F. 1980. *Pratique de l'analyse des données, Tome II, Abrégé théorique, étude de cas de modèle*. Dunod, Paris. 230 p.
- BERGER W. H. 1990. The Younger Dryas cold spell - a quest for causes. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleocol.*, 89, 219-237.
- BERGER A. 1992. *Le climat de la Terre : un passé pour quel avenir ?* De Boeck Université, 230 p.
- BERTAUX J., LEORU M. P., SDUSIÉS F., SONDAG F. 1996. The use of quantitative mineralogy linked to palynological studies in palaeoenvironmental reconstruction: the case study of the "Lagoa Campestre" lake, Salitre, Minas Gerais, Brazil. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 323, 65-71.
- BICHET V. 1997. *Impact des contraintes environnementales sur la production sédimentaire d'un bassin versant jurassien au cours du Postglaciaire. Le système limnologique de Chaillexon (Doubs, France)*. Dijon : Centre des Sciences de la Terre, Université de Bourgogne, Thèse, 212 p.
- BIRKS H. J. B. 1973. *Past and Present vegetation of the isle of Skye. A palaeoecological study*. Cambridge University Press, 100 p.
- BOSSUET G., RUFFALDI P., MARTIN J., CHOQUIER A. et MIGNOT C. 1993. Reconnaissance du contexte géologique et de la nature du remplissage d'un bassin lacustre du Jura Méridional. Le lac de Cerin (Ain, France). *Eclog. Geol. Helv.*, 86, 2, 355-376.
- BOSSUET G. 1994. *Approche géométrique et volumétrique des remplissages lacustres dans le Massif Jurassien aux périodes tardiglaciaire et holocène. Le lac de Cerin*. Besançon : Université de Franche-Comté. D. E. A., 55 p.
- BOSSUET G., RUFFALDI P., MAGNY M., RICHARD H. et MOUTHON J. 1996. Dynamique et approche quantitative des remplissages fini- et postwürmiens du bassin lacustre de Cerin (Jura, France). *Bull. Soc. Géol. France*, 167, 4, 483-494.
- BOUROCHE J.-M. et SAPORTA G. 1989. *L'analyse des données*. Paris : Presses Universitaires de France (Que sais-je ? Le point des connaissances actuelles, n°1854), 127 p.
- BRADLEY R. S. et JONES P. D. 1992. *Climate Since A. D. 1500*. Routledge, London: R. S. Bradley and P. D. Jones, 679 p.
- BRASS G. W. 1976. The variations of the marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio during Phanerozoic time: Interpretation using a flux model. *Geoch. Cosmo. Acta*, 40, 720-721.
- GRAY J. R. 1968. Glaciation and solar activity since the fifth century BC and the solar Cycle. *Nature*, 220, 672-673.
- BRINDLEY G. W. et BROWN G. 1980. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Monograph n° 5*. London: Mineralogical Society, 540 p.
- BROCHIER J. L., CORBOUD P., PUGIN C. et RACHOUD-SCHNEIDER A. M. 1991. L'histoire naturelle et humaine des habitats préhistoriques de l'ancien lac de Fiave - Carera (Trentin, Italie du Nord). L'approche systématique par carottage des sites d'une tourbière. *Revue d'Archéométrie*, 15, 63-74.
- BROECKER W. S., ANDREE M., WOLFLI W., OESCHGER H., BONANI G., KENNET J. et PETEET D. 1988. The chronology of the last deglaciation: implications to the cause of the Younger Dryas event. *Palaeoceanography*, 3, 1, 1-19.

- BROECKER W. S. et DENTON G. 1990. Les cycles glaciaires. *Pour la Science*, 149, 62-71.
- BURGA C. A. 1988. Swiss vegetation history during the last 18 000 years. *New Phytol.*, 110, 581-602.
- BURGER A. et SCHAEER J. P. 1996. La vallée du locle, oasis jurassienne, Histoire géologique : Le paysage - Les eaux. In : *Cahiers de L'Institut Neuchâtel*. Hauterive : Editions Gilles Attinger, 1-246.
- BURROUGHS W. J. 1992. *Weather cycles. Real or Imaginary ?* Cambridge: Cambridge University Press, 201 p.
- CAMERON C. C. 1970. Peat Deposits of Northeastern Pennsylvania: The use of physical characteristics of peat and geologic settings of the deposits as guides to peat resources. *Geological Survey Bulletin*, 1317, A, 1-89.
- CAMERON C. C. 1975. Some Peat Deposits in Washington and Southeastern Aroostook Countries, Maine: The use of physical characteristics of peat and physiographic forms of the deposits as guides to peat resources. *Geological Survey Bulletin*, 1317, C, 1-26.
- CAMPY M. 1982. *le quaternaire franc-comtois. Essai chronologique et paléoclimatique*. Besançon : Faculté des Sciences et Techniques, Université de Franche-Comté, Thèse, 575 p.
- CAMPY M., HEIM J. et RICHARD H. 1985. Dynamique du comblement et contexte climatique du remplissage tardi- et postglaciaire du lac de Chaillexon (Doubs, France). *Ecol. Med.*, XI, 1, 135-146.
- CAMPY M. et RICHARD H. 1987. Dynamique et typologie des remplissages lacustres tardi- et postglaciaires de la chaîne jurassienne. *Doc. C. E. R. L. A. T., Mem. 1, Travaux français en Paléolimnologie* : 165-180.
- CAMPY M. et RICHARD H. 1988. Modalités et chronologie de la déglaciation würmienne dans la chaîne jurassienne. *Bull. A. F. E. Q.*, 2, 3, 81-91.
- CAMPY M. et ARN R. 1991. The Jura glaciers: palaeogeography in the würmian circum-Alpine zone. *Soreas*, 20, 17-27.
- CAMPY M., BICHET V., DI GIOVANNI C., RICHARD H., RICHARD J. et OLIVE P. 1994. Évolution des flux de matière depuis 12 000 ans dans la Haute Vallée du Doubs (France). *Bull. Soc. Géol. France*, 165, 4, 381-400.
- CAMPY M., BICHET V., DI GIOVANNI C., RICHARD H., RICHARD J. et DURAND A. 1994. Évolution des flux sédimentaires au cours du Postglaciaire : Enregistrement dans le remplissage lacustre de Chaillexon (Doubs, France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 319, série II, 103-109.
- Carte géologique au 1/50000 ème. 1960. Morteau, feuille XXXV-24. Orléans. BRGM eds. Direction du Service Géologique et des laboratoires.
- CANNON H., SHACKLETTE H. T. et BASTRON H. 1968. Metal Absorption by Equisetum (Horsetail): Contributions to geochemical prospecting for minerals. *Geological Survey Bulletin*, 1278, A, 1-20.
- CHAIX L., PÉTREQUIN A. M., PÉTREQUIN P. et RICHARD H. 1989. Le cerf néolithique du Lac d'Ilay (Jura). *R. A. E. du C. N. R. S.*, 40, 105-110.
- CHAMAYOU H. et LEGROS J. P. 1989. *Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol*. Paris : Presses Universitaires de France, 593 p.
- CHANG S. C. et JACKSON J. 1958. Soil phosphorus fractions in some representative soils. *J. Soil Sci.*, 9, 1, 109-119.
- CHAREF A. et SHEPPARD S. M. 1984. Carbon and oxygen isotope analysis of calcite or dolomite associated with organic matter. *Isotopes Geoscience*, 2, 325-333.
- CHAUVE P. 1975. *Jura. Guides géologiques régionaux*. Paris : Masson, 230 p.
- CIBOIS P. 1991. *L'analyse factorielle*. Paris : Presses Universitaires de France (Que sais-je ? Le point des connaissances actuelles, n°2095), 127 p.
- CLERC J. 1988. *Recherches pollenanalytiques sur la paléocologie tardiglaciaire et holocène du Bas-Dauphiné*. Marseille : Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Faculté des Sciences et des Techniques de Saint-Jérôme, Thèse, 179 p.
- CLERC J., MAGNY M. et MOUTHON J. 1989. Histoire d'un milieu lacustre du Bas-Dauphiné : Le Grand Lemps. Étude palynologique des remplissages tardiglaciaires et holocènes et mise en évidence de fluctuations lacustres à l'aide d'analyses sédimentologiques et malacologiques. *Rev. Paléobio.*, 8, 1, 1-19.
- CLYMO R. S. 1963. Ion exchange in sphagnum and its relation to bog ecology. *Ann. Bot.*, 27, 309-324.
- CLYMO R. S. 1965. Experiments on breakdown of Sphagnum and in two bogs. *J. Ecol.*, 53, 747-757.
- COLMAN S. M. 1982. Chemical weathering of basalts and andesites - Evidence from weathering rinds. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 1246, 1-51.

Références

- CORBOUD P. 1991. *Le système STRATO : systématisation de la description des niveaux sédimentaires et programmes de traitement graphique. Notice d'utilisation.* Document interne. Département d'anthropologie de l'Université de Genève. 15 p.
- COUR P. 1974. Nouvelles techniques de détection des flux et des retombées polliniques : étude de la sédimentation des pollens et des spores à la surface du sol. *Pollens et Spores*, XVI, 1, 103-141.
- COWGILL U. M. et HUTCHINSON G. E. 1970. Chemistry and mineralogy of sediments and their source minerals. *Trans. Amer. Phil. Soc.*, 60, 14, 37-101.
- CRAIG H. 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbonyl dioxide. *Geoch. Cosmo. Acta*, 12, 133-149.
- CUPILLARD C., PÉTREQUIN P., RICHARD H. et PININGRE J.-F. 1991. La néolithisation du Jura. In : *Mésolithique et Néolithisation en France et dans les régions limitrophes. Actes du 113^{ème} Congrès National des Sociétés Savantes (Strasbourg : 5-9 avril 1988).* Paris : CHTS, 347-387.
- CUPILLARD C., MAGNY M., RICHARD H., RUFFALDI P. et MARGUIER S. 1994. *Mésolithisation et Néolithisation d'une zone de moyenne montagne : Évolution du peuplement et du paysage de la Haute Vallée du Doubs.* Besançon : CNRS, Laboratoire de Chrono-Ecologie, UPR 7557, 120 p.
- DAMMAN A. W. H. 1978. Distribution and movement of elements in ombrotrophic peat bogs. *Oikos*, 30, 480-495.
- DANSGAARD W., JOHNSEN S. J., CLAUSEN H. B., DAHL-JENSEN D., GUNDESTROP N. S., HAMMER C. U., HVIDBERG C. S., STEFFENSEN J. P., SVEINBJÖRNSDÓTTIR A. E., JOUZEL J., BOND G. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, 218-220.
- DAVAUD E. 1976. *Contribution à l'étude géochimique et sédimentologique de dépôts lacustres récents (Lac de Morat, Suisse).* Genève : Faculté des Sciences, Université de Genève, Thèse, 129 p.
- DEAN W. E. 1993. Physical properties, mineralogy, and geochemistry of Holocene varved sediments from Elk Lake, Minnesota, in Bradbury J. P. and Dean W. E., eds., *Elk Lake Minnesota: Evidence for Rapid Climate Change in the North-Central United States: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 276.*
- DE CERENVILLE H. B. 1981. *Commune du Locle, Aménagement d'un terrain industriel au Marais du Col-des-Roches - Le Locle.* Lausanne : Laboratoire de Géotechnique H. B. DE CERENVILLE S. A. (Sondages et essais en Laboratoire). Rapport sur les études géotechniques, 35 p.
- DE VISSER J.-P. 1989. *Clay mineral stratigraphy of Miocene to recent marine sediments in the central Mediterranean.* Utrecht : Faculteit Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit te Utrecht, Thèse, 244 p.
- DEBELMAS J. 1974. *Géologie de la France, 2 Les chaînes plissées et leurs avant-pays.* 2 vol. Paris : Doin Éditeurs, 540 p.
- DELEBECQUE A. 1898. *Les Lacs Français.* Paris, 100 p.
- DELUC J. A. 1838. Lettre sur les blocs erratiques alpins épars à de grandes distances des Alpes. *Bull. Soc. Géol. France*, IX, 1, 366-367.
- DESORT G. 1842. Indications sur la limite des blocs erratiques dans le Jura. *Bull. Soc. Géol. France*, XIV, 1, 326-328.
- OI GIOVANNI C. 1994. *Production, flux et stocks de matière organique dans un système limnologique au cours du postglaciaire : le bassin de Chaillexon (Doubs, France).* Dijon : Université de Bourgogne, Thèse, 305 p.
- DU PASQUIER L. 1897. Le glaciaire du Val de Travers. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 22, 59-63.
- DUPLESSY J. C. et RUDDIMAN W. 1984. La fonte des calottes glaciaires. *La Recherche*, 156, 806-818.
- DUPLESSY J. C. et MOREL P. 1992. *Gros temps sur la planète.* Paris : Odile Jacob, 142 p.
- DURIG D. T., ESTERLE J. S., DICKSON T. J. et DURIG J.R. 1988. An investigation of the chemical variability of woody peat by FT-IR spectroscopy. *Appl. Spectr.*, 42, 7, 1239-1244.
- EICHER U. et SIEGENTHALER U. 1976. Palynological and oxygen isotope investigations on Late-Glacial sediment cores from Swiss lakes. *Boreas*, 5, 109-117.
- EICHER U. et SIEGENTHALER U. 1983. Stable isotopes in lake marl and mollusc shells from Lobsigensee (Swiss Plateau). *Studies in the Late-Glacial of Lobsigensee 6. Rev. Paléobio.*, 2, 2, 217-220.
- EMERSON S. 1976. Early diagenesis in anaerobic lake sediments: chemical equilibria in interstitial waters. *Geoch. Cosmo. Acta*, 40, 925-934.
- ERDTMAN G. 1969. *Handbook of Palynology, Morphology, Taxonomy, Ecology: An Introduction to the study of Pollen grains and Spores.* Munksgaard: 486 p.

- ERGIN M. 1982. Mineralogisch-sedimentologische und geochemische untersuchungen an zwei sedimenikernen aus schlickgebieten der Westlichen Ostsee : Einfluß klimatischer und anthropogener Faktoren auf die Sedimentation in den Meeresbuchten Schleswig-Holsteins. Heidelberg: Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität, Thèse, 182 p.
- EVANS D. J. A., BUTCHER C. et KIRTHISINGHA A. 1994. Neoglaciation and an early "Little Ice Age" in western Norway: lichenometric evidence from the Sandane area. *The Holocene*, 4, 3, 278-289.
- FAEGRI K. et IVERSEN J. 1989. Field techniques. In: *Handbook of Paleontological techniques*. San Francisco & London: Kummel B. & Raup D., 482-494.
- FAUQUETTE S. 1995. Etude paléoécologique (pollen et macrorestes) d'un site du Briançonnais : Le lac de Cristol (Hautes-Alpes, France). 13^{ème} Symposium de l'A.P.L.F. Palynosciences, 3, 51-60.
- FAVRE J. 1911. Description géologique des environs du Locle et de La Chaux-de-Fonds (NE ; CH). Genève : Faculté des Sciences, Université de Genève, Thèse, 475 p.
- FAVRE J., BOURQUIN P. et STEHLIN H. G. 1937. Etudes sur le Tertiaire du Haut-Jura neuchâtelois. *Mem. Soc. Pal. Suisse*, 60, 1-47.
- FERRERO J. 1966. Dosage des principaux minéraux des roches par diffraction de rayons X. Bordeaux, (Rapport de la Commission Française du Pétrole, non publié), 20 p.
- FILIPPI M.-L. 1996. Palaeoclimatic reconstruction since the Late-Glacial in Western Switzerland: Stable isotopes on lacustrine carbonates. Lausanne: Université de Lausanne, Institut de Minéralogie et Géochimie, Thèse, 135 p.
- FINGER W., FREY A., KELTS K. et HSÜ K. J. 1984. Carbonate mineralogy and organic carbon content of Zübo sediments. In: K. J. Hsü and K. R. Kelts. *Quaternary Geology of Lake Zürich: An Interdisciplinary Investigation by Deep-Lake Drilling*. 13. Stuttgart, 63-73.
- FINNEY H. R. et FARNHAM R. S. 1968. Mineralogy of the inorganic fraction of peat from two raised bogs in northern Minnesota. In: 3rd International Peat Congress (Quebec) Proc. 3. Quebec, 102-108.
- FIRBAS F. 1949. Spät- und nacheiszeitliche wald geschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen. Fischer Jena, 340 p.
- FIRBAS F. 1954. Die Synchronisierung der mitteleuropäischen Pollendiagramme. *Danm. Geol. Unders.*, 80, 2, 12-21.
- FOUCAULT A. et RAULT J. -F. 1995. Dictionnaire de géologie. Guides géologiques régionaux, Masson, 4ème Eds, Paris. 324 p.
- FRINCK C. R. 1969. Chemical and Mineralogical Characteristics of Eutrophic Lake Sediments. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 33, 369-372.
- FRITZ S.C., ENGSTRÖM D.R. et HASKELL B.J. 1994 - "Little Ice Age" aridity in the North American Great Plains : a high-resolution reconstruction of salinity fluctuations from Devils Lake, North Dakota, USA. *The Holocene*, 4, 1, 69-73.
- FROELICH P. N. 1979. Analysis of organic carbon in marine sediments. *Am. Soc. Limnol. Oceanogr.*, 25, 3, 564-572.
- FYFE G. J. 1990. The effect of water depth on ice-proximal glaciolacustrine sedimentation: Salpausselkä I, southern Finland. *Boreas*, 19, 147-164.
- GAC J.-Y. 1979. Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Strasbourg : Université Louis Pasteur. Thèse, 270 p.
- GAILLARD M.-J. 1984 a. Etude palynologique de l'évolution tardiglaciaire et postglaciaire de la végétation du Moyen-Pays Romand, Suisse. *Diss. Bot.*, 77, 322 p.
- GAILLARD M.-J. 1984 b. Analyse pollinique et macrorestes végétaux des sédiments tardi- et postglaciaires du Grand Marais de Boussens, Moyen-Pays Romand, Suisse. *Diss. Bot.*, 72, 117-136.
- GAILLARD M.-J. et MDULIN B. 1989. New results on the Late-Glacial history and environment of the Lake of Neuchâtel (Switzerland). Sedimentological and palynological investigations at the Paleolithic site of Hauterive-Champréveyres. *Eclog. Geol. Helv.*, 82, 1, 203-218.
- GAY I. 1995. Évolution des flux minéraux pendant le Tardiglaciaire et l'Holocène dans un bassin montagneux à roches magmatiques sous latitudes moyennes : Le bassin du Lac de Chambon, Massif Central, France. Orléans : Université d'Orléans. Thèse, 207p.
- GALLANDAT J.-D. 1982. Prairies marécageuses du haut-jura, Molinietales, Scheuchzeria-Caricetea fuscae et Phragmitetea. 2. Matériaux pour le levé géobotanique de la Suisse, fasc. 58, 327 p.
- GAUTHIER E. 1996. Perception de l'anthropisation du massif jurassien au cours des trois dernier millénaires à partir des indices polliniques. Besançon. Université de Franche-Comté. Mémoire de Maîtrise d'Histoire de l'Art et d'Archéologie. 115 p.

Références

- GHOSH D. P. 1971 a. Inverse filter coefficients for computation of apparent resistivity standard curves over horizontally stratified earth. *Geophys. Prosp.*, 19, 192-217.
- GHOSH D. P. 1971 b. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophys. Prosp.*, 19, 769-775.
- GIBBS R. J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170, 1088-1090.
- GINORAUX G. et KÜBLER B. 1989. Analyse minéralogique de quatre coupes de l'Hauterive de la région neuchâteloise. Exemple de l'analyse multivariée au service de la lithostratigraphie. *Mem. Soc. Neuch. Sci. Nat.*, XI, 81-100.
- GIOVANNINI G., POGGIO G. et SEQUI P. 1975. Use of an automatic CHN analyser to determine organic and inorganic carbon in soils. *Commun. Soil Science and Plant Analysis*, 6, 1, 39-49.
- GOEURY C. 1988. Acquisition, gestion et représentation des données de l'analyse pollinique sur micro-ordinateur. *Trav. Sec. Sci. Tech.*, XXV, 405-416.
- GREFFIER F., RICHARD H. et RUFFALDI P. 1992. Computerizing the acquisition of Archeobotanic Counting (Scopoli-Fossiles). *Rev. Archéol.*, 16, 63-69.
- GRIMM E. C., JACOBSON G. L., WATTS W. A., HANSEN B. C., MAASCH K. A. 1993. A 50,000-Years record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich Events. *Science*, 261, 1, 198-200.
- GROUSSET F., LATOUCHE C. et MAILLET N. 1983. Clay minerals as indicators of wind and current contribution to Post-Glacial sedimentation on the Azores/Iceland ridge. *Clay Minerals*, 18, 65-75.
- GROVE J. M. 1988. *The Little Ice Age*. Methuen, London, 488 p.
- GUELAT M., RACHOUO-SCHNEIDER A. M. et SCHIFFEROECKER F. 1993. Évolution de la végétation, des sols et des sédiments et influence des occupations humaines. In : *Office du Patrimoine historique. Archives palustres et vestiges de l'âge du Bronze entre Glovelier et Boécourt* (JU ; Suisse (Cahiers d'Arch. jurassienne, 4)). Porrentruy : Société jurassienne d'émulation, 75-81.
- GUMERMAN R. C. 1993. Aqueous phosphate and lake sediment interaction. *Proc. 13 th Conf. Great Lakes Res.*, 673-682.
- GUIOT J., TESSIER L., SERRE-BACHET F., GUIBAL F. et GADBIN C. 1988. Annual temperatures changes reconstructed in W-Europe and NW-Africa back to A. D. 1100. *Annal. Geophys. Special issue, XIII General Assembly of European Geophysical Society, Bologna, 21-25 March*, 85 p.
- GUPPY S. F., HAPPEY-WOOD C. M. et WOOD D. G. E. 1978. Chemistry of sediments from two linked lakes in North Wales. *Freshwater Biology*, 8, 401-413.
- GUYOT M. 1843. Sur la distribution des terrains erratiques entre les Alpes et le Jura. *Bull. Soc. Géol. France*, I, 2, 640-641.
- HADORN P. 1987. Pollenanalytische Untersuchungen über die jüngere Vegetations- und Siedlungsgeschichte am Murtensee. *Freiburger Archäologie*, 107-127.
- HADORN P. 1992. *Vegetationsgeschichtliche Studie am Nordufer des Lac de Neuchâtel, Pollenanalytische Untersuchungen im Loclat, in der Bucht von Hauterive/Saint-Blaise und in den neolithischen Ufersiedlungen von Saint-Blaise/Bains des Dames*. Bern: Geobotanisches Institut der Universität, Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Univ., 112 p.
- HADORN P. 1994. Saint-Blaise/Bains des Dames, 1. Palynologie d'un site néolithique et histoire de la végétation des derniers 16 000 ans. In : *Egloff Michel et Arnold Béné. (Archéologie Neuchâteloise, 18)*. Neuchâtel : Musée Cantonal d'Archéologie, 1-96.
- HAKANSON L. et JANSSON M. 1983. *Principles of Lake Sedimentology*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 316 p.
- HANSELMANN K. W. 1986. Microbially mediated processes in environmental chemistry (Lake Sediments as Model Systems). *Chimia*, 40, 5, 146-159.
- HARTIKAINEN H. 1979. Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lake sediments. *J. Scient. Agri. Soc. Finland*, 51, 537-624.
- HEDBERG O. 1946. Pollen morphology in the genus *Polygonum* L. s. lat. and its taxonomical significance. *Svensk. botanisk. Tid. skript.*, 40, 4, 371-404.
- HICKS S. 1971. Pollen-analytical evidence for the effect of prehistoric agriculture on the vegetation of North Derbyshire. *New Phytol.*, 70, 647-667.
- HUBSCHIMD F. et LANG G. 1985. Les Embreux: Holocene environments of a mire in the Swiss Jura Mountains. *Diss. Bot.*, 87, 115-125.
- HUET S. 1995. Plus chaud, plus froid ? le brouillard ! *Sciences et Avenir*, 75, 80-83.
- IMBRIE J. 1985. The future of palaeoclimatology. in "Palaeoclimate Analysis and Modelling". Willey, New York. A. O. Hecht, Eds. 423-432.

- ISCHER A. 1935. Les tourbières de la vallée des Ponts-de-Martel. Recherches paléobotaniques et contribution à l'étude des associations végétales. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 60, 1-50.
- JACCARD A. 1858 a. Sondages dans les marais du Locle. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, IV, 57-58.
- JACCARD A. 1858 b. Flore fossile du terrain d'eau douce. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, IV, 56-57.
- JACCARD A. 1892. Contribution à l'étude des terrains erratiques dans le Jura. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, XX, 124-173.
- JANSSEN C. R. 1959. *Alnus* as a disturbing factor in pollen diagrams. *Acta Bot. Neerl.*, 8, 55-58.
- JANTSCHIK R. 1991. *Mineralogische und geochemische Untersuchungen spätquartärer Tiefsee-sedimente aus dem Westeuropäischen Becken (bei 47°30' N und 19°30' W)*. Neuchâtel: Faculté des Sciences, Université de Neuchâtel, Thèse, 85 p.
- JOUSSAUME S. 1993. *Climat, d'hier à demain*. CNRS Eds. 185 p.
- JOUKOWSKY E. et BUFFLE J.-P. 1938. Étude sur la partie occidentale du Lac de Genève. Constitution physique et chimique des sédiments du lac de Genève. *Mem. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève.*, 41, 4, 415-466.
- KELLER P. 1928. Pollenanalytische Untersuchungen an Schweizer Mooren und ihre florensgeschichtliche Deutung. In: (Veröff. Geobot. Inst.) Zürich: Rübel, 1-75.
- KELTS K. et HSÜ K. J. 1978. Freshwater carbonate sedimentation. In: Lerman, A. *Lakes chemistry, geology and physics*. New York: Springer, 293-324.
- KELTS K. et TALBOT M. 1990. Lacustrine carbonates as Geochemical Archives of Environmental Change and Biotic/Abiotic Interactions. In: Tilzer M. M. and Serruya C. (Editors). *Large Lakes, Ecological Structure and Function*, 288-315.
- KENDALL M. 1976. *Times Series*. Charles Griffin, 150 p.
- KESSLER J. et CHAMBRAUD A. 1986. *La météo de la France, Tous les climats localité par localité*. J. C. Lattès, 342 p.
- KLUG H. P. et ALEXANDER L. E. 1974. X-ray Diffraction Procedures. Wiley-intersciences eds. New York, 342 p.
- KOLLA V., BISCAYE P. et HANLEY A. 1979. Distribution of Quartz in Late Quaternary Atlantic Sediments in relation to climate. *Quat. Res.*, 11, 261-277.
- KRAMER J, HERBES S. et ALLEN H. 1972. Phosphorus: Analysis of water, biomass and sediment. In: Herbert E. Allen et James R. Kramer. *Nutrients in natural waters*. Robert L. METCALF and James H. PITTS, 51-100.
- KÜBLER B. 1962 a. *Étude de l'Oehningien (Tortonien) du Locle (Neuchâtel-Suisse)*. Neuchâtel: Faculté des Sciences, Université de Neuchâtel, Thèse, 42 p.
- KÜBLER B. 1962 b. Étude pétrographique de l'Oehningien (Tortonien) du Locle (Suisse occidentale). *Beit. zur Mineral. und Petrogr.*, 8, 267-314.
- KÜBLER B., BETRIX M. A. et FAUGEL P. 1979. Répartition de quelques éléments dans les sédiments de surface du Lac de Neuchâtel, modèle sédimentologique et géochimique. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 102, 45-50.
- KÜBLER B., BETRIX M. A. et MONNIER F. 1979. Les premiers stades de la diagénèse organique et de la diagénèse minérale, une tentative d'équivalence. Première partie : Zonéographie par la maturation de la matière organique. *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. U. -Ing.*, 45, 108, 1-22.
- KÜBLER B. 1984. Les indicateurs des transformations physiques et chimiques dans la diagénèse. Température et calorimétrie. in *Thermométrie et barométrie géologiques*. M. Lagache eds. Société Française de Minéralogie et de Cristallographie. Vol. 2, Chap. 14, 489-596.
- KÜBLER B., et SCHWALB A. 1988. *Analyses des teneurs en eau par balance "thermo-control", influence du chauffage sur les densités et porosités, causes des écarts*. Neuchâtel, (Cahiers Instit. Géol., non publié), 7 p.
- KÜBLER B. 1988. Les sédiments de la Motte, Haut-Fond au milieu du lac de Neuchâtel. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 111, 95-98.
- KÜTTEL M. 1977. Pollenanalytische und geochronologische Untersuchungen zur Pinotino-Schwankung (Jüngere Oryas). *Boreas*, 6, 259-274.
- LÄDHE E. 1969. Biological activity in some natural and drained peat soils with special reference to oxidation-reduction conditions. *Acta Forn. Fenn.*, 94, 1-69.
- LAMBERT G. ET LAVIER C. 1993. *Analyses dendrochronologiques d'un nouveau lot de bois provenant du Prieuré Saint-Vincent d'Illay à Chaux-du-Dombief (Jura)*. Besançon. Rapport, Laboratoire de Chrono-Écologie, UMR 9946 du CNRS, 13 p.

Références

- LAMY AU ROUSSEAU R. 1991. *Dynamique sédimentaire dans un lac proglaciaire*. 15 : *Deltas, Rythmites, Variations du niveau de l'eau, Changements climatiques : Exemple du Bassin de la Combe d'Ain (Jura, France) au Pléniglaciaire würmien*. Dijon : Centre des Sciences de la Terre (Mem. Géol. Univ. de Dijon), 121 p.
- LARGIN I. F., PRIEMSKAYA S. E. et SVENTIKHOVSKAYA A. N. 1972. Microelements content and distribution in peat deposits. In: IV, 77-89.
- LE ROY LADURIE E. 1983. *Histoire du climat depuis l'an mil*. Paris : Champs-Flammarion, 255 p.
- LERNAM A. 1978. *LAKES: Chemistry, Geology, Physics*. New-York, Heidelberg, Berlin: Abraham Lernam, 363 p.
- LESQUEREUX L. 1844. *Quelques recherches sur les marais tourbeux en général*. Neuchâtel : Wolfrath, 80 p.
- LISTER G. 1988 a. Stable isotopes from lacustrine ostracoda as tracers for continental palaeoenvironment. in: DECKER P., COLIN J.-P. et PEYPOUQUET J.-P.: *Ostracoda in the Earth Sciences*, 201-218.
- LISTER G. 1988 b. A 15 000- Year Isotopic Record from Lake Zürich of deglaciation and Climatic Change in Switzerland. *Quaternary Research*, 29, 129-141.
- LIVETT E. A., LEE J. A. et TALLIS J. H. 1979. Lead, Zinc and Copper analyses of British Blanket Peats. *J. Ecol.*, 67, 3, 865-891.
- LIVINGSTONE D. A. 1962. Vertical distribution of phosphorus in Linsley pond mud. *Limn. Oceanogr.*, 7, 57-62.
- LIVINGSTONE D. A. 1963. Chemical composition of Rivers and lakes. In: *Fleischer Michael. Data of Geochemistry (U. S. Geological Survey Professional Paper, 440-G)*. Washington: United States Department of The Interior, 1-52.
- LOTTER A. F. et ZBINDEN H. 1989. Late-Glacial pollen analysis, oxygen-isotope record, and radiocarbon stratigraphy from Rotsee (Lucerne), Central Swiss Plateau. *Eclog. Geol. Helv.*, 82, 1, 191-202.
- LOTTER A.F., SIEGENTHALER U., EICHER U. et BIRKS H. J. B. 1992 a. Late-glacial climatic oscillations as recorded in Swiss lake sediments. *J. Quat. Sc.*, 7, 3, 187-204.
- LOTTER A. F., AMMANN B., BEER J., HAJDAS I. et STURM M. 1992 b. A step towards an absolute time-scale for the Late-Glacial: annually laminated sediments from Soppensee (Switzerland). In: E. Bard et W. S. Broecker. *The Last Deglaciation: Absolute and Radiocarbon Chronologies*. Heidelberg: Springer-Verlag, 45-68.
- LOTTER A. F., AMMANN B. et STURM M. 1992 c. Rates of change and chronological problems during the late-glacial period. *Climate Dynamics*, 6, 233-239.
- MACKERETH F. J. M. 1965. Chemical investigations of lake sediments and their interpretation. *Proc. Roy. Soc. London*, 161, B, 295-310.
- MACKERETH F. J. M. 1966. Some chemical observations on post-glacial lake sediments. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B, 250, 165-213.
- MAGNY M. 1991 a. Une nouvelle mise en perspective des sites archéologiques lacustres : Les fluctuations holocènes des lacs jurassiens et subalpins. In : *GALLIA PREHISTOIRE, Fouilles et Monuments Archéologiques en France Métropolitaine*. 35. Paris : CNRS Éditions, 253-282.
- MAGNY M. 1991 b. Une approche paléoclimatique de l'Holocène : Les fluctuations des lacs du Jura et des Alpes du Nord françaises. Besançon : Université de Franche-Comté, Thèse, 633 p.
- MAGNY M. 1992 a. Holocene lake-level fluctuations in Jura and the northern subalpine ranges, France : regional pattern and climatic implications. *Boreas*, 21, 319-334.
- MAGNY M. 1992 c. Sédimentation et dynamique de comblement dans les lacs du Jura au cours des 15 derniers millénaires. *Rev. Archéo.*, 16, 27-49.
- MAGNY M. 1993 a. Correlation of lake-level fluctuations with atmospheric ^{14}C variations: a climate-sun relation. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 317, II, 1349-1356.
- MAGNY M. 1993 b. Un cadre climatique pour les habitats lacustres préhistoriques ? *C. R. Acad. Sci. Paris*, 316, II, 1619-1625.
- MAGNY M. 1993 c. Solar influences on Holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and the atmospheric ^{14}C record. *Quat. Res.*, 40, 1-9.
- MAGNY M. 1993 d. Holocene fluctuations of lake levels in the French Jura and sub-Alpine ranges, and their implications for past general circulation patterns. *The Holocene*, 3, 4, 306-313.
- MAGNY M. 1994. Holocene climatic oscillations in Jura and Alps: oceanic and solar forcing ? *C. R. Acad. Sci. Paris*, 319, II, 667-674.
- MAGNY M. 1995 a. Les sédiments des lacs, miroir du climat. *La Recherche*, 285, 60-65.
- MAGNY M. 1995 b. Quinze mille ans d'archives climatiques dans les lacs du Jura. *Images de Franche-Comté*, 11, 6-9.

- MAGNY M. 1995 c. Successive oceanic and solar forcing indicated by Younger Dryas and Early Holocene climatic oscillations in the Jura. *Quat. Res.*, 43, 279-285.
- MAGNY M. 1995 d. *Une histoire du climat, des derniers mamouths au siècle de l'automobile*. Errance eds. Paris. 176 p.
- MAGNY M., MOUTHON J. et RUFFALDI P. 1995. Late holocene level fluctuations of the lake Ilay in Jura, France: sediment and mollusc evidence and climatic implications. *J. Paleolimnol.*, 13, 219-229.
- MAGNY M. et RUFFALDI P. 1995. Younger Dryas and early holocene lake-level fluctuations in the Jura mountains, France. *Boreas*, 24, 155-172.
- MANGER G. E. 1963. Porosity and Bulk Density of Sedimentary Rocks: Contributions to Geochemistry. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1144, E, 1-47.
- MANGERUD J., BERGLUND B. E., ANDERSEN S. T. et DONNER J. J. 1974. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. *Boreas*, 3, 109-128.
- MANGERUD J. et BERGLUND B. E. 1978. The subdivision of the Quaternary of Norden: a discussion. *Boreas*, 7, 179-181.
- MASON B. I. 1976. *Towards the understanding and prediction of climatic variations*. (Quat. J. Royal Meteor. Soc., n°102), 478 p.
- MATTHEY F. 1971. Contribution à l'étude de l'évolution Tardi- et Postglaciaire de la végétation dans le Jura Central. BERN : H. Zoller, Verlag Hans Huber. *Beit. Geol. Karte der Schweiz*, n°53, 86 p.
- MATTSON S. et KOULTER-ANDERSSON E. 1954. Geochemistry of a raised bog. *Kungl. Lant. Ann.*, 21, 321-366.
- MATTSON S. et KOULTER-ANDERSON E. 1955. Geochemistry of a raised bog. II Some Nitrogen Relationships. *Kungl. Lant. Ann.*, 22, 219-224.
- MAYEWSKI P. A., MEEKER L. D., WHITLOW S., TWICKLER M. S., MORRISON M. C., BLOOMFIELD P., TAYLOR K. C. 1993. The Atmosphere During the Younger Dryas. *Science*, 261, 195-197.
- MAYEWSKI P. A., MEEKER L. D., WHITLOW S., TWICKLER M. S., MORRISON M. C., BLOOMFIELD P., BOND G. C., ALLEY R. B., GOW A. J., GROOTES P. M., MEESE D. A., RAM M., TAYLOR K. C. et WUMKES W. 1994. Changes in the atmospheric circulation and ice cover over the North Atlantic during the last 41 000 years. *Science*, 263, 1747-1751.
- Mc CREA J. M. 1950. On the Isotopic Chemistry of Carbonates and a Paleotemperature Scale. *J. Chem. Phys.*, 18, 849-857.
- Mc KENZIE J. M. et ARISTEGUI D. 1995. Temperature dependent carbon-isotope fractionation of organic matter: a potential paleoclimatic indicator in Holocene lacustrine sequences. in "Problems of stable isotope in tree-ring, lake sediments and peat-bogs as climatic evidence for the Holocene. B. Frenzel eds. European Science Foundation. Strasbourg, 17-28.
- MEYER DE STADELHOFEN C. 1991. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. Paris : Techniques et documentation - Lavoisier, 183 p.
- MILANKOVITCH M. 1930. Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. in "Handbuch der Klimatologie". W. Köppen und R. Geiger eds. Berlin. 352 p.
- MIKAMI T. 1992. *Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age Climate. International Symposium on the Little Ice Age Climate*. Tokyo: Department of geography. Tokyo Metropolitan University. 342 p.
- MILLOT G. 1960. *Géologie des argiles*. Paris : Masson, 499 p.
- MITCHELL R. L. 1954. Trace elements in Scottish peats. In: *International Peat Symposium (Dublin) Proc. (Section B3)*, 3. Dublin: 1-9.
- MOE O. 1974. Identification key for triletes microspores of Fennoscandian Pteridophyta. *Grana*, 14, 132-142.
- MOSCARIELLO A. 1996. *Quaternary geology of the Geneva Bay (Lake Geneva, Switzerland): sedimentary record, paleoclimate and paleoenvironmental reconstruction since the last glacial cycle*. Genève : Institut des Sciences de la Terre, Université de Genève, Thèse, 230 p.
- MOUTHON J. 1989. Analyse de la distribution des malacocénoses de 23 lacs français. *Ann. Limnol.*, 25, 205-213.
- MOUTHON J. 1990. Importance des conditions climatiques dans la différenciation des peuplements malacologiques des lacs européens. *Arch. Hydrobiol.*, 118, 353-370.
- MOUTHON J. 1992 a. Snail and bivalve populations analysed in relation to physico-chemical quality of lakes in eastern France. General criteria for population analyses. *Hydrobiol.*, 245, 147-156.

Références

- MDUTHON J. 1992 b. Peuplements malacologiques lacustres en relation avec la physico-chimie de l'eau et des sédiments : II. Les espèces. *Ann. Limnol.*, 28, 109-119.
- NICOLET A. C. 1839. Constitution géologique de la vallée de La Chaux-de-Fonds (NE ; CH). *Mem. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, II, 1-26.
- NORVELL W. A. 1974. Insolubilisation of inorganic phosphates by anoxic lake sediment. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 38, 441-445.
- NUSSBAUM F. et GYGAX F. 1935. Zur Ausdehnung des risszeitalter Rhone-gletschers im französischen Jura. *Eclog. Geol. Helv.*, 28, 1, 658-665.
- OINUMA K., SHIMODA S. et SUDO T. 1972. Triangular diagrams for surveying chemical compositions of chlorites. *J. Tokyo Univ.*, 15, 1-33.
- OTSUKI A. et WETZEL R. G. 1972. Coprecipitation of phosphate with carbonates in a marl lake. *Limn. Oceanogr.*, 17, 763-767.
- PANOFISKY H. A. et BRIER G. W. 1958. *Some Applications of Statistics to Meteorology*. London: Pennsylvania State University Press, 0 p.
- PECKER J. C. et RUNCORN S. K. 1990. *The earth's Climate and Variability of the Sun over Recent Millennia*. Cambridge: Cambridge University Press, 120 p.
- PENCK A. et BRUCKNER E. 1909. *Die Alpen im Eiszeitalter*. 150 p.
- PENNINGTON W. et SACKIN M. J. 1975. An application of principal components analysis to the zonation of two late Devensian profiles. *New Phytol.*, 75, 419-453.
- PERSOZ F. 1982. *Inventaire minéralogique, diagenèse des argiles et minéralostratigraphie des séries jurassiques et crétacées inférieures du Plateau Suisse et de la bordure sud-est du Jura entre les lacs d'Annecy et de Constance*. (Mat. Cart. Géol. Suisse, num. sp.), 155 p.
- PERSOZ F. 1969. Fidélité de l'analyse quantitative des poudres de roches par diffraction X. *Bull. Cen. Rech. Pau-SNPA*, 3, 2, 329-355.
- PERSOZ F. et STEINHAUSER N. 1970. Microfaciès, pétrographie et géochimie du Crétacé inférieur du Molard de Vions (Jura méridional). *C. R. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*, 5, 177-190.
- PERSOZ F. et REMANE J. 1976. Minéralogie et géochimie des formations à la limite Jurassique-Crétacé dans le Jura et le Bassin Vocontien. *Eclog. Geol. Helv.*, 69, 1-138.
- PFISTER C., YAN Z. et SCHÜLE H. 1994. Climatic variations in western Europe and China, AD 1645-1715: a preliminary continental-scale comparison of documentary evidence. *The Holocene*, 4, 2, 206-211.
- PIDANCET et LORY. 1847. Phénomènes erratiques dans les hautes vallées du Jura. *C. R. Acad. Sci. Paris*, XXV, 718-720.
- PITTET A., SETTLER R. et KÜBLER B. 1990. Use of coprostanol as a specific allochthonous fecal indicator in surface sediment of the Lake of Neuchâtel. *Aquatic Sciences*, 52, 2, 129-143.
- POCHON M. 1976. Les processus d'altération de quelques types de calcaire dans les sols du Haut-Jura suisse. *Bull. Soc. Géol. France*, XVIII, 1, 33-39.
- POCHON M. 1978. *Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse, phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide*. Neuchâtel : Faculté des Sciences, Université de Neuchâtel, Thèse, 190 p.
- PDNS A. 1970. *Le pollen*. Paris : Presses Universitaires de France (Que sais-je ? Le point des connaissances actuelles, n°783), 127 p.
- PORTNER C. 1951. *La formation du sédiment calcaire du Lac de Neuchâtel, Etude physico-chimique*. Neuchâtel : Université de Neuchâtel, Faculté des Sciences, Thèse, 94 p.
- PUGIN A., BEZAT E., WIEDMANN M. et WILDI W. 1993. Le bassin d'Ecoteaux (Vaud, Suisse) : Témoin de trois cycles glaciaires quaternaires. *Eclog. Geol. Helv.*, 86, 2, 343-354.
- PUTOT P. 1975. Les groupements herbacés de la région de Morez-Bois d'Amont (Jura). *Études phytosociologiques et applications à la détermination des valeurs pastorales*. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 16, 3^{ème} série, 77-140.
- RACHOUO-SCHNEIDER A. M. 1993. Contribution à l'histoire de la végétation tardi- et postglaciaire de la vallée de Delémont à partir des données de la palynologie. In : *Office du Patrimoine historique. Archives palustres et vestiges de l'âge du Bronze entre Glovelier et Boécourt (JU ; Suisse)*, (Cahiers d'Arch. jurassienne, 4). Porrentruy : Société jurassienne d'Emulation, 53-69.
- REDFIELD A. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Scien.*, 46, 205-221.
- RAISWELL R., CANFIELD D. E. et BERNER R. A. 1994. A comparison of iron extraction methods for the determination of degree of pyritisation and the recognition of iron-limited pyrite formation. *Chem. geol.*, 111, 101-110.

- RAJSKA-JASIEWICZOWA M.** 1977. Impact of prehistoric man on natural vegetation recorded in pollen diagrams from different regions of Poland. *Folia Quaternaria*, 49, 75-91.
- RAMEAU J.-C. et RICHARD J.-L.** 1990. Carte de la végétation de la France. CNRS.
- RAMPINO M. R., SANDERS J. E., NEWMAN W. S. et KONIGSSON L. K.** 1987. *Climate: History, periodicity and Predictability*. New York: Van Nostrand Reinhold, 210 p.
- REILLE M. et DE BEAULIEU J.-L.** 1988 a. History of the Würm and holocene vegetation in western Velay (Massif Central, France) : A comparaison of pollen analysis from three corings at Lac du Bouchet. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 54, 233-248.
- REILLE M. et DE BEAULIEU J.-L.** 1988 b. La fin de l'Éémien et les interstades du Pléniwürm mis pour la première fois en évidence dans le Massif Central français par l'analyse pollinique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, II, 1205-1210.
- REILLE M.** 1990. *Leçons de palynologie et d'analyse pollinique*. Paris : Editions du CNRS, 206 p.
- REILLE M. et DE BEAULIEU J.-L.** 1990. Pollen analysis of a long upper Pleistocene continental sequence in a Velay maar (Massif Central, France). *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 80, 35-48.
- REILLE M.** 1991. L'origine de la station de pins à crochets de la tourbière de Piret (Aude) et de quelques stations isolées de cet arbre dans les Vosges et le Jura. *Bull. Soc. Bot. de France*, 138, 2, 123-148.
- REILLE M. et ANDRIEU V.** 1991. Données nouvelles sur l'histoire postglaciaire de la végétation des Pyrénées occidentales (France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 312, II, 97-103.
- REILLE M.** 1992. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Marseille : Laboratoire de Botanique historique et Palynologie, 520 p.
- REY J.-P. et KÜBLER B.** 1983. Identification des micas des séries sédimentaires par diffraction X à partir de la série harmonique (001) des préparations orientées. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.*, 63, 13-36.
- REYNOLDS R. C. et MOORE D. M.** 1989. *X-Ray Diffraction and the identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford-New York: Oxford University Press, 332 p.
- RICHARD H.** 1983. *Nouvelles contributions à l'histoire de la végétation franc-comtoise tardiglaciaire et holocène à partir des données de la palynologie*. Besançon : Université de Franche-Comté, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Thèse, 155 p.
- RICHARD H.** 1988. Palynologie et climat. *Histoire & Mesure*, III, 3, 359-384.
- RICHARD H.** 1991. Perception palynologique de l'évolution de la végétation riveraine des lacs Jurassiens : réalité ou fiction ? 116^{ème} Congr. nat. des Soc. sav., Préprotohistoire. 149-159.
- RICHARD H. et GERY S.** 1993. Variations in pollen proportions of *Plantago lanceolata* and *P. major/media* at a Neolithic lake dwelling, Lake Chalain, France. *Veget. Hist. Archeobot.*, 2, 79-88.
- RICHARD H.** 1993. Palynological Micro-Analysis in Neolithic Lake Dwellings. *J. Archeol. Sci.*, 20, 241-262.
- RICHARD H.** 1994. Indices polliniques d'une néolithisation précoce sur le premier plateau du Jura (France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 318, II, 993-999.
- RICHARD H.** 1995. Analyse de l'anthropisation du milieu à partir de quelques exemples de variations de pollens d'arbres et d'arbustes. in *L'HOMME ET LA DÉGRADATION DE L'ENVIRONNEMENT*, XV^{ème} rencontre Internationale d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes. Juan les Pins. APDCA Eds. 143-159.
- RICHARD H.** 1996. Nouvelles données polliniques en Bresse : le marais de La Peupleraie à Le Miroir (Saône-et-Loire, France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 323, série II a, 531-538.
- RICHARD H. et RUFFALDI P.** 1996. L'hypothèse du déterminisme climatique des premières traces polliniques de néolithisation sur le massif jurassien (France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 322, série II, 77-83.
- RICHOZ I. et GAILLARD M.-J.** 1989. Histoire de la végétation de la région neuchâteloise de l'époque néolithique à nos jours. Analyse pollinique d'une colonne sédimentaire prélevée dans le lac de Neuchâtel (Suisse). *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, 74, 4, 355-377.
- RICHOZ I., GAILLARD M.-J. et MAGNY M.** 1994. The influence of human activities and climate on the development of vegetation at Seedorf, Southern Swiss Plateau during the Holocene: a case study. *Diss. Bot.*, 234, 423-445.
- ROBERT C. et CHAMLEY H.** 1990. Paleoenvironmental significance of clay mineral associations at the Cretaceous-Tertiary passage. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 79, 205-219.
- ROBERTSON F. C.** 1991. Geochemistry of Ground Water in Alluvial Basins of Arizona and Adjacent Parts of Nevada, New Mexico, and California. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 1406, C. 1-87.

Références

- ROBINSON J. W. 1966. *Atomic absorption spectroscopy*. New York. Marcel Dekker eds, 204 p.
- ROESCH M. 1983. Geschichte der Nussbaum Seen und der ihrer Umgebung seit dem Ausgang der letzten Eiszeit auf Grund quartärbotanischer, stratigraphischer und sedimentologischer Untersuchungen. *Mitt. Thurg. ges.*, 45, 0-110.
- ROLLI M. 1992. Dosage semi-quantitatif RX sur Scintag. *Cahiers Instit. Géol.*, 1-49.
- ROLLI M. et RUCH P. 1994. Concentrazione di strontio nei sedimenti lacustri : anomalie nei laghi svizzeri. *AIQUA*, 11-12.
- ROYER J. M. 1991. *Synthèse eurosibérienne, phytosociologique et phytogéographique de la classe des Festuco-Brometea*. Berlin, Stuttgart : J. CRAMER (Diss. Bot., n°178), 296 p.
- RUDDIMAN W. F. ET MC INTYRE A. 1981. The North Atlantic during the last deglaciation. *Paleogeogr., Paleoclimato., Paleocol.*, 35, 145-214.
- RUFFALDI P. 1991. Première contribution à l'étude de la végétation tardiglaciaire et holocène du Bugey : L'exemple de la tourbière de Cerin (Ain, France). *Rev. Paléobio.*, 10, 1, 137-149.
- RUFFALDI P. 1993. *Histoire de la végétation du Jura méridional depuis le retrait du glacier würmien à partir des analyses palynologiques du lac de Cerin (Ain, France)*. Besançon : Université de Franche-Comté, Thèse, 236 p.
- RUFFALDI P. 1996. La fin du Pléniglaciaire dans le Jura méridional à partir des analyses polliniques du lac de Cerin (Ain, France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 320, série II a, 1117-1123.
- RUMLEY G. et ADATTE T. 1983. *Méthode rapide de séparation des fractions 2 et 16 µm pour analyse par diffraction X*. Neuchâtel : (Cahiers Instit. Géol., non publié), 4 p.
- SCHARDT H. 1905. Vallée des ponts. In : *Dictionnaire géographique de la Suisse*. 3. Neuchâtel, 726-729.
- SCHNEIDER S. 1989. Le changements des climats. *Pour la Science*, 145, 46-54.
- SCHNEIDER S. 1994. The Medieval Warm Period. *Climatic Change*, 26, 2-3, 109-344.
- SCHOELLAMMER P. 1992. *Fluctuations altitudinales de la limite supérieure de la forêt sur le site du Couchant (Vaud, Suisse)*. Université de Grenoble I, Joseph Fourier, D. E. A., 30 p.
- SCHOELLAMMER P. 1995. Nouvelle contribution pollenanalytique à la connaissance des variations holocènes de la limite supérieure de la forêt dans la chaîne du Jura : Le site du Couchant (Vaud, Suisse). 13^{ème} Symposium de l'A. P. L. F. *Palynosciences*, 3, 19-36.
- SCHWALB A. 1992. *Die Sedimente des Lac de Neuchâtel (Schweiz) : Reconstruction spät- und postglazialer Klima- und Umweltveränderungen*. Neuchâtel : Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, Thèse, 138 p.
- SERRUYA C. 1969. *Les dépôts du Lac Léman en relation avec l'évolution du bassin sédimentaire et les caractères du milieu lacustre*. Genève : Université de Genève, Laboratoire de Géologie, Thèse, 254 p.
- SHACKLETTE H. T. 1965 a. Bryophytes associated with mineral deposits and solutions in Alaska: Contributions to geochemical prospecting for minerals. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1198, C, 1-17.
- SHACKLETTE H. T. 1965 b. Element content of bryophytes: Contributions to geochemical prospecting for minerals. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1198, D, 1-20.
- SHACKLETTE H. T. et CONNOR J. J. 1973. Airborne Chemical Elements in Spanish Moss: Statistical studies in field geochemistry. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 574, E, 1-44.
- SHARMA T. et CLAYTON R. M. 1968. Measurements of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of total oxygen of carbonates. *Geoch. Cosmo. Acta*, 29, 1347-1353.
- SIDLER C. 1984. Résultats palynologiques du forage du Lac de Zürich. *Rev. Paléobio.*, Volume spécial, 199-208.
- SIDLER C. 1985. Palynological investigations of Zübo sediments. In: K. J. Hsü and K. R. Kelts. *Quaternary Geology of Lake Zürich: An Interdisciplinary Investigation by Deep-Lake Drilling*, 13, 103-114.
- SONDAG F., SDOUBIES F., LEDRU M.-P., et DELAUNE M. 1993. Geochemical markers of palaeo-environnements: relations between climatic changes, vegetation and geochemistry of lake sediments, southern Brazil. *Appli. Geochem.*, Suppl. Issue., 2, 165-170.
- SPALENSTEIN H. 1984. *Pédogénèse sur calcaires durs dans les Hautes-Alpes calcaires*. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale. Thèse, 175 p.
- SPINNER H. 1926 a. Analyse pollinique de la tourbe de deux marais de la Brévine. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, L., 25-35.
- SPINNER H. 1926 b. Analyse pollinique de la tourbière du Grand-Cachot (Jura neuchâtelois). *Verh. Schweiz. Naturf. Ges. Freiburg*, II, 47-52.

- SPINNER H. 1927 a. Pollenanalytische Untersuchungen an einem Schweizer-Jura-Hochmoor. *Beitr. Deutsch. Bot. Ges.*, XLV, 78-82.
- SPINNER H. 1927 b. Les tourbières et l'histoire de la forêt. *Le Rameau de Sapin*, 2^{ème} série, 23, 20-25.
- SPINNER H. 1927 c. Le climat de la vallée de la Brévine. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, LI, 37-40.
- SPINNER H. 1929. Nouvelle contribution à l'analyse pollinique des tourbières de la vallée de la Brévine - La chaux-du-Milieu. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 54, 3-36.
- S.R.A.E. 1986. *Le Lac d'Ilay (Jura) : Etude Ecologique*. Masson J. P. (Dir.), Conseil Régional de Franche-Comté Agence de Bassin Ministère de L'Environnement, 95 p.
- S.R.A.E. 1985. *Les Lacs de Maclu (Jura) : Etude Ecologique*. Masson J. P. (Dir.), Conseil Régional de Franche-Comté Agence de Bassin Ministère de L'Environnement, 104 p.
- STARKEY H. C., BLACKMON P. D. et HAUFF P. L. 1984. The routine mineralogical analysis of clay-bearing samples. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1563, 1-26.
- STONE D. E. et BROOME R. C. 1975. Angiospermae, Juglandaceae (A. Rich. ex Kunth). In: *Siwert Nilsson, Swedish Museum of Natural History, Palynological Laboratory. (World Pollen and Spore Flora, 4)*. Stockholm: Collegium Palynologicum Scandinavicum, 1-35.
- STRÖMBERG B. O. 1994. Younger Dryas deglaciation at Mt. Billigen, and clay varve dating of Younger Dryas/Preboreal transition. *Boreas*, 23, 2, 177-193.
- STUIVER M. 1970. Oxygen and Carbon Isotope Ratio of Fresh-Water Carbonates as Climatic Indicators. *J. Geoph. Res.*, 75, 27, 5247-5257.
- STUIVER M. et PEARSON G. W. 1986. High Precision Calibration of the Radiocarbon Timescale A. D. 1950-500 B. C. *Radiocarbon*, 28, 805-808.
- SWART P. K., BURNS S. J. et LEGER J. J. 1991. Fractionation of the stable isotopes of oxygen and carbon in carbonyl dioxide during the reaction of calcite with phosphoric acid as a function of temperature and technique. *Chem. geol.*, 86, 89-96.
- THANIKAIMONI G., CARATINI C., VENKATACHALA B. S., RAMANUJAM C. G. K. et KAR R. K. 1984. *Pollens d'angiospermes du Tertiaire de l'Inde et leurs relations avec le pollens du Tertiaire d'Afrique*. Pondichéry, India: Thanikaimoni et al., Travaux de la section Scientifique et Technique (Institut Français de Pondichéry, XIX, 92 p.
- PUNT W. 1976. *The northwest European Pollen Flora*. W. Punt Eds. Amsterdam. 15 Vol.
- TOLONEN K. 1983. *The Post-glacial Fire Record*. in Wein R. W. et MacLean D. A.: *The role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems*. Wiley eds. 145-167.
- TRAVERSE A., SPACKMAN W. et AMES H. T. 1976. *Catalog of fossil spores and pollen*. 40 Vol. University Park, Pennsylvania.
- TROELS-SMITH J. 1955. *Characterization of unconsolidated sediments*. 73 p.
- TURBERG, P. 1987. *Cariographie du Synclinal du Prévoux*. Neuchâtel : Institut de Géologie. Diplôme. 50 p.
- TURNER J. 1964. The anthropogenic factor in vegetational history. *New Phytol.*, 63, 73-89.
- VELDE B. 1995. *Origin and Mineralogy of Clays: Clays and the environment*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 334 p.
- VERARDO D., FROELICH P. et MC INTYRE A. 1990. Determination of organic carbon and nitrogen in marine sediments using the Carlo Erba NA-1500 Analyser. *Deep-Sea Research*, 37, 1, 157-165.
- VERNET J.-P. 1958. *Études sédimentologiques et pétrographiques des formations tertiaires et quaternaires de la partie occidentale du Plateau Suisse*. *Eclog. Geol. Helv.*, 51, 3, 1115-1152.
- VIEL M. 1983. *Étude sédimentologique et géochimique des dépôts récents du Lac Majeur*. Genève : Université de Genève, Département de géologie et de paléontologie, Thèse, 129 p.
- WAKSMAN S. A. 1930. Chemical composition of peat and the role of organisms in its formation. *Am. J. Sci., Fifth series*, 19, 109, 39-54.
- WARD F. N., LAKIN H. W. et CANNEY F. C. 1963. Analytical methods used in geochemical exploration by the U. S. Geological Survey. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1152, 1-99.
- WARD F. N., NAKAGAWA H. M., HARMS T. F. et VAN SICKLE G. H. 1969. Atomic-absorption methods of analysis useful in geochemical exploration. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1289, 1-42.
- WATSON P. G., THOMSON P. E. et GOODCHILD C. M. 1982. Differentiation between particulate organic and inorganic carbon in samples of marine origin. *Carlo Erba Symposium on Elemental Analysis*, 19 p.
- WEBER H. 1981. *Sedimentologische und Geochemische Untersuchungen im Greifensee (Kanton Zürich, Schweiz)*. Zürich : E. T. H., Thèse, 204 p.

Références bibliographiques

- WEGMÜLLER S. 1966. Über die Spät- und Postglaziale vegetationsgeschichte des südwestlichen Jura. Bern : H. Zoller, Verlag Hans Huber. *Beit. Geol. Karte der Schweiz*, n°48, 143 p.
- WEGMÜLLER S. 1977. *Pollenanalytische Untersuchungen zur spät- und postglazialen Vegetationsgeschichte der französischen Alpen (Dauphiné)*. Bern : Samuel Wegmüller, Verlag Paul Haupt, 185 p.
- WELTEN M. 1982. Stand der palynologischen Quartärforschung am schweizerischen Nordalpenrand. *Geogr. Helv.*, 2, 75-83.
- WELTEN M. 1988. Neue pollenanalytische Ergebnisse über das Jüngere Quartär des nördlichen Alpenvorlandes der Schweiz (Mittel- und Jungpleistozän). In : *Beit. Geol. Karte der Schweiz*, 162, 1-35.
- WELZ B. 1976. *Atomic absorption spectroscopy*. Weinheim-Verlag Chemie, 267p.
- WILLIAMS J. D. H., SYERS J. K., SHUKLA S. S. et HARRIS R. F. 1971. Level of inorganic and total phosphorus in lake sediments. *Env. Sc. and Tech.*, 5, 1113-1120.
- WILLIAMS J. D. H., MURPHY T. P. et MAYER T. 1976. Rates of accumulation of phosphorus forms in lake Erie sediments. *J. Fish. Res. Bord of Canada*, 33, 430-439.
- WILSON S. A., KANE J. S., CROCK J. G. et HATFIELD D. B. 1987. Chemical methods of separation for optical emission, atomic absorption spectrometry and colorimetry. In: Philip A. Baedeker. *Methods for geochemical analysis*. (U. S. Geological Survey Bulletin, 1770). Denver: Department of the interior, 1-14.
- WOILARD G. 1975. *Recherches palynologiques sur le Pléistocène dans l'est de la Belgique et dans les Vosges lorraines*. Thèse, Louvain-la-Neuve : Institut de Géographie, Université catholique de Louvain. *Acta Geog. Lov.*, n°14, 166 p.
- WOILARD G. et MOOK W. G. 1982. Carbon dates at Grande Pile: correlation of land and sea chronologies. *Science*, 215, 159-161.
- WRIGHT JR. H. E. 1989. The Amphi-atlantic distribution of the Younger Dryas Palaeoclimatic oscillation. *Quart. Sci. Rev.*, 8, 295-306.
- ZEROUAL E. 1995. *Enregistrements climatiques dans les sédiments du lac ISLI (Haut Atlas du Maroc) : Variations des influences climatiques sahariennes et méditerranéennes (de 34 000 ans B.P. à nos jours)*. Neuchâtel : Université de Neuchâtel, Institut de géologie, Laboratoire de Minéralogie, Pétrographie et Géochimie, Thèse, 234 p.
- ZICKER E. L., BERGER K. C. et HASLER A. D. 1956. Phosphorus release from bog lake muds. *Limn. Oceanogr.*, 1, 296-303.
- ZOHDY R. A. A. 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54, 2, 245-253.



Liste des figures et des tableaux

Liste des figures et tableaux

Partie 1, Chapitre 1

Gravure du Musée d'Histoire du Locle montrant le Col-des-Roches vu du côté des Brenets. Dépourvue des arbres masquant actuellement le site, cette gravure illustre de manière saisissante l'encoignure érodée par les torrents qui ont débordé l'ensellement du Col, notamment à l'époque würmienne, in Burger, Schaer, 1996	31
Figure 1.1 : Localisation des sites étudiés	32
Figure 1.2 : Aspect structural de la Chaîne jurassienne (d'après Chauve, 1975)	34
Figure 1.3 : Maxima d'extension des glaciers rhodaniens et jurassiens pendant le Riss et le Würm d'après Nussbaum, Gygax (1935)	35
Figure 1.4 : Calotte glaciaire jurassienne et lacs porglaciaires d'après Campy (1982)	36
Figure 1.5 : Quelques paramètres climatiques de la Chaîne jurassienne d'après Ruffaldi (1993)	37
Figure 1.6 : Cadre phytogéographique de la Chaîne jurassienne (d'après Royer, 1991 ; Ruffaldi, 1993)	38
Figure 1.7 : Situation géographique du Marais du Col-des-Roches (Neuchâtel, Suisse)	39
Figure 1.8 : Carte géologique simplifiée des environs du Locle (D'après la carte géologique de Morteau 1960 1/50000e, Feuille XXXV-24)	41
Figure 1.9 : Attribution chronologique d'après Nussbaum, Gygax (1935) des moraines du Locle et de ces environs à la glaciation du Riss	41
Figure 1.10 : Attribution chronologique d'après Favre (1911) des moraines du Locle et de ses environs à la glaciation du Würm	42
Figure 1.11 : Attribution chronologique d'après Aubert (1965) des moraines du Locle et de ses environs à la glaciation du Würm	43
Figure 1.12 : Propositions des limites potentielles d'extension de la langue glaciaire dans la zone du Locle - la Brévine	44
Figure 1.13 : Stade de retrait présumé des différentes langues glaciaires du Locle -La Brévine	44
Figure 1.14 : Diagramme ombrothermique de la ville du Locle établi à partir des relevés journaliers effectués de 1949 à 1994	45
Figure 1.15 : Limites du bassin versant des lacs de Maclu et d'Ilay (Jura, France)	47
Figure 1.16 : Carte géologique simplifiée des environs du Lac d'Ilay (d'après SRAE, 1985)	48

Partie 1, chapitre 2

Foreuse APAGEO munie d'une tarière de 1.5 m acquise avec la participation conjointe des laboratoires de Besançon, Neuchâtel, Marseille et Dijon (photographie : P. Schoellammer, Août 1993 dans le Marais du Col-des-Roches)	49
Figure 1.17 : Coupe longitudinale du Marais du Col-des-Roches reconstituée à partir de forages situés le long d'un transect ENE/WSW (Favre, 1911, non modifié)	52
Figure 1.18 : Localisation des points de sondage du Marais du Col-des-Roches	53
Figure 1.19 : Localisation du point de sondage du lac d'Ilay	53

Liste des

Figure 1.20 : Schémas simplifiés des différents types de carottiers et de leurs principes de prélèvement	54
Figure 1.21 : Technique du sondage électrique, dispositif Schlumberger (d'après : Meyer De Stadelhofen, 1991)	56
Figure 1.22 : La chaîne opératoire	58
Figure 1.23 : Méthodes de préparation des échantillons pour chaque type de sédiment (d'après Bastin et Couteaux, 1966)	59
Figure 1.24 : Zonation du Tardiglaciaire et de l'Holocène	61
Tableau 1.1 : Caractéristiques du diffractomètre et des paramètres analytiques utilisés	63
Tableau 1.2 : Tableau des valeurs des positions en degré 2 θ et en Angström (Å) des pics 100 (Pics ayant les plus fortes intensités) des minéraux	64
Tableau 1.3 : Tableau des coefficients d'absorption massique des différents minéraux rencontrés utilisés dans le calcul des pourcentages (d'après Rolli, 1992)	64
Figure 1.25 : Méthode de séparation rapide des fractions inférieures à 2 et 2-16 μ m (d'après Rumley, Adatte, 1983 ; Starkey <i>et al.</i> , 1984)	65
Tableau 1.4 : Tableau rassemblant les positions en degré 2 θ et en Angström des pics des séries harmoniques des minéraux des fractions < 2 μ m et 2-16 μ m	67
Tableau 1.5 : Tableau des paramètres analytiques tirés de Perkin Elmer User's Guide	69
Figure 1.26 : Schéma du fonctionnement du spectrophotomètre d'absorption atomique de type Perkin Elmer™ muni d'un double faisceau	70
Figure 1.27 : Schéma théorique du principe des dosages en colorimétrie	71

Partie 2, Chapitre 1

Photographie conservée au Musée d'Histoire du Locle montrant les travaux de correction du Bied à la rue des Marais, devant le jardin public en Avril 1900 in Burger, Schaer, 1996	77
Figure 2.1 : Diagramme de résistance des sols au battage du carottier (d'après les données du laboratoire de géotechnique De CERENVILLE, 1981)	78
Figure 2.2 : corrélations entre les valeurs de teneur en eau, de l'indice des vides et de l'indice de compressibilité mesurées sur plusieurs échantillons représentatifs des faciès de ce remplissage (De Cerenville, 1981)	80
Figure 2.3 : Plan de localisation des sondages électriques et des forages mécaniques	81
Figure 2.4 : Distribution spatiale des résistivités apparentes AB/2 de 1 à 150 m	82
Figure 2.5 a : Pseudo-section de résistivité recoupant transversalement le Marais d'après les données de G. Bossuet	83
Figure 2.5 b : Pseudo-section de résistivité recoupant transversalement le Marais d'après les données de G. Bossuet	84
Figure 2.5 c : Pseudo-section de résistivité recoupant longitudinalement le Marais d'après les données de G. Bossuet	85
Figure 2.5 d : Pseudo-section de résistivité recoupant longitudinalement le Marais d'après les données de G. Bossuet	86
Figure 2.6 : Déformation de la surface piézométrique de la nappe phréatique,	

sous l'effet du pompage dans l'Oeningien sous-jacent, au puits des Rondes ; les lignes isopièses sont exprimées par leur altitude (d'après Burger, Schaer, 1996)	87
Figure 2.7 : Sondages électriques paramétrés sur les logs stratigraphiques des forages mécaniques	88
Figure 2.8 : Représentation cartographique en courbes isolignes de la base du remplissage lacustre meuble	89
Figure 2.9 a : Coupe géologique interprétative (A- A') à travers les formations géologiques de la région du Locle	90
Figure 2.9 b : Coupe géologique interprétative (B- B') à travers les formations géologiques de la région du Locle	90
Figure 2.10 : Répartition des corps sédimentaires dans le lac quaternaire du Locle	93
Partie 2, Chapitre 2	
Photographie aérienne de la Combe Argovienne de Entre deux Monts, vue de l'est, avec ses prairies sur roches mameuses, bordées de part et d'autre par les crêts calcaires du Malm, sur lesquels persiste la forêt. Dans le coin supérieur droit on peut voir les prairies de la plaine du Locle in (Burger, Schaer, 1996)	95
Figure 2.11 : Diagramme pollinique en pourcentages relatifs du Pléniglaciaire (hors texte)	
Figure 2.12 : Diagramme pollinique en pourcentages relatifs du Pléniglaciaire, sans les tertiaires (hors texte)	
Figure 2.13 : Diagramme pollinique en pourcentages relatifs de l'Holocène (carottier à câble) (hors texte)	
Figure 2.14 : Diagramme pollinique en pourcentages relatifs de l'Holocène (carottier russe) (hors texte)	
Figure 2.15 : Analyses polliniques ponctuelles du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	98
Figure 2.16 : Comparaison des zones polliniques locales identifiées après analyse pollinique des trois forages du Locle	99
Figure 2.17 : Concentrations polliniques absolues des sédiments pléniglaciaires du Locle	101
Figure 2.18 : Concentrations polliniques absolues des sédiments du Dryas récent et de l'Holocène du Locle	102
Figure 2.19 : Comparaison des zones polliniques locales définies au Locle avec la chronozone admise dans la littérature régionale	104
Figure 2.20. : Tableau des datations ¹⁴ C effectuées dans les sédiments du Locle	107
Figure 2.21 : Diagramme pollinique d'anthropisation du Locle	114
Figure 2.22 : Diagramme pollinique (en pourcentage) du forage d'Ilay (Jura, France)	117
Figure 2.23. : Concentrations polliniques absolues des principaux taxons du forage d'Ilay	118
Figure 2.24 : Diagramme pollinique d'anthropisation d'Ilay	122
Partie 2, Chapitre 3	
Le Col-des-Roches à la fin du siècle dernier, par Fritz Huguenin-Lassaugette. Les glaciaires d'éboulis qui tapissent la falaise du Col commencent à être exploités, le tunnel routier ayant supplanté le chemin qui les gravissait en écharpe jusqu'à l'échancrure rocheuse (cf. Page de couverture) pour redescendre en France. Le chemin de fer Le Locle-Morteau, inauguré en 1884, a nécessité la construction d'un second pont sur le Bied. Gravure du Musée d'histoire du Locle in Burger, Schaer, 1996	125

Liste des

Figure 2.25 : Composition minérale du sédiment total du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) obtenue par diffraction aux rayons X, Intensités brutes en CPM (Coups Par Minute)	128
Figure 2.26 : Pourcentages des minéraux du sédiment total en fonction de la profondeur du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	129
Figure 2.27 : 1- Comparaison des minéraux deux à deux : recherche des coefficients de corrélations linéaires entre les variables 2- Analyse factorielle en Composantes Principales des pourcentages de tous les minéraux du sédiment total du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	130
Figure 2.28 : Analyse factorielle en Composantes Principales des pourcentages des principaux minéraux du sédiment total du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	131
Figure 2.29 : Analyse factorielle en Composantes Principales des niveaux du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	132
Figure 2.30 : Diffractogrammes caractéristiques des tourbes, des gyttjas et des craies du forage LLC 1-2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	133
Figure 2.31 : Composition minérale du sédiment total du forage LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) obtenue par diffraction aux rayons X, Intensités brutes en CPM (Coups Par Minute)	134
Figure 2.32 : Pourcentages des minéraux du sédiment total en fonction de la profondeur du forages LLC 1-5 ; détail de la tranche 12/13 m du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	134
Figure 2.33 : Pourcentages des minéraux du sédiment total en fonction de la profondeur des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	135
Figure 2.34 : Analyse factorielle en Composantes Principales des pourcentages des minéraux du sédiment total des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	136
Figure 2.35 : Diffractogrammes caractéristiques de deux unités sédimentaires du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	137
Figure 2.36 : Composition minéralogique des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) d'après la diffraction aux rayons X, Intensités brutes en Coups Par Minute (CPM)	137
Figure 2.37 : Pourcentages des minéraux des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	138
Figure 2.38 : Analyse factorielle en Composantes Principales sur les pourcentages des minéraux présents dans le sédiment total du forage LLC2 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	139
Figure 2.39 : Comparaison des zones minéralogiques des trois forages du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	140
Figure 2.40 : Diffractogrammes caractéristiques des préparations orientées des sédiments du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	142
Figure 2.41 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse < à 2 µm glycolée des sédiments compris entre 10 et 41 m dans le forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	143
Figure 2.42 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse 2-16 µm des sédiments compris entre 10 et 41 m dans le forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	144

Figure 2.43 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse < 2 µm glycolée des sédiments des forages LLC 1-3 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	145
Figure 2.44 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse 2-16 µm non glycolée des sédiments des forages LLC 1-3 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	146
Figure 2.45 : Analyse factorielle en Composante Principales des intensités brutes des minéraux de la fraction < 2 µm glycolée du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches	147
Figure 2.46 : Analyse factorielle en Composante Principales des intensités brutes des minéraux de la fraction < 2 µm glycolée des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches	148
Figure 2.47 : Analyse factorielle en Composante Principales des intensités brutes des minéraux de la fraction 2-16 µm du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches	148
Figure 2.48 : Analyse factorielle en Composante Principales des intensités brutes des minéraux de la fraction 2 -16 µm des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches	149
Figure 2.49 : Représentation triangulaire des séries harmoniques des micas des sédiments des forages LLC 1 et LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	150
Figure 2.50 : Représentation triangulaire des séries harmoniques des chlorites des sédiments des forages LLC 1 et LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	151
Tableau 2.1 : Appréciation des pourcentages d'illite et de smectite dans les smectoïdes des marnes de l'Oehningien Moyen du Locle	152
Figure 2.51 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction minérale argileuse inférieure à 2 µm glycolée des marnes de l'Oeningien Moyen du Locle (NE, CH)	152
Figure 2.52 : Intensités brutes en CPS (en Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction granulométrique 2-16 µm des marnes de l'Oeningien Moyen du Locle (NE, CH)	153
Figure 2.53 : Représentation triangulaire des séries harmoniques des micas et des chlorites des niveaux oeningiens du Locle (NE, CH)	154
Figure 2.54 : Synthèse des analyses sur les fractions argileuses des forages du Marais du Col-des-Roches (NE, CH) avec les phases les plus caractéristiques	155
Tableau 2.2 : Appréciation du pourcentage d'illite dans les smectoïdes du forage LLC 1	156
Tableau 2.3 : Appréciation du pourcentage d'illite dans les smectoïdes des forages LLC 1-5 du Locle	156
Figure 2.55 : Analyse factorielle en Composantes Principales des données de la minéralogie (pourcentages) des sédiments du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches (NE, CH)	158
Figure 2.56 : Pourcentages moyens des différents minéraux constituant les faciès des argiles silteuses grises	160
Figure 2.57 : Pourcentages moyens des différents minéraux constituant le faciès des craies lacustres	161
Figure 2.58 : Pourcentages moyens des différents minéraux constituant le faciès des tourbes	161

Liste des

Figure 2.59 : Pourcentages moyens des différents minéraux constituant les faciès des gyttjas.	162
Figure 2.60 : Diffractogrammes caractéristiques des sédiments du lac d'Ilay (Jura, France)	167
Figure 2.61 : Intensités brutes (en Coups Par Minute) des minéraux du sédiment total de la carotte courte du lac d'Ilay (Jura, France)	168
Figure 2.62 : Pourcentages des minéraux du sédiment total de la carotte courte du lac d'Ilay (Jura, France)	168
Figure 2.63 : Analyse Factorielle en Composantes Principales des pourcentages des minéraux du sédiment total d'Ilay	169
Figure 2.64 : Diffractogrammes caractéristiques des sédiments du lac d'Ilay (Jura, France)	170
Figure 2.65 : Intensités brutes des pics des minéraux du résidu insoluble total glycolé du forage du lac d'Ilay (Jura, France)	171
Figure 2.66 : Analyse factorielle en Composantes Principales des données brutes de la fraction totale glycolée	172
Figure 2.67 : Diagramme triangulaire des séries harmoniques des préparations orientées pour l'identification des chlorites des sédiments du sondage d'Ilay (Jura, France)	172
Figure 2.68 : Diagramme triangulaire des séries harmoniques des préparations orientées pour l'identification des micas des sédiments du sondage d'Ilay (Jura, France)	173
Figure 2.69 : Évolution de l'intensité du détritisme minéral et pollinique du Pléniglaciaire à l'Holocène au Locle	176
Figure 2.70 : Évolution du détritisme minéral au cours du Subboréal et du Subatlantique à Ilay	179
Partie 2, Chapitre 4	
Photographie du plan d'eau du lac d'Ilay : au premier plan les phragmites colonisant la zone littorale du lac près de l'île qui se trouve à quelques mètres sur la gauche (P. Schoellammer, 1994)	181
Figure 2.71 : Mesures des teneurs en eau, porosités et analyses élémentaires (en pourcents) des sédiments du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches	185
Figure 2.72 : Mesures des teneurs en eau, porosités et analyses élémentaires (en pourcents) des sédiments des forages LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches	186
Figure 2.73 : Mesures des teneurs en eau, porosités et analyses élémentaires (en pourcents) des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches	187
Figure 2.74 : Mesures des éléments (en pourcents) de la phase acido-soluble des sédiments du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches	189
Figure 2.75 : Mesures des éléments (en pourcents) de la phase acido-soluble des sédiments du forage LLC 1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches	189
Figure 2.76 : Mesures des éléments (en pourcents) de la phase acido-soluble des sédiments du forage LLC 2 du Marais du Col-des-Roches	190
Figure 2.77 : Analyses Factorielles en Composantes Principales réalisées sur les pourcentages des paramètres géochimiques du forage LLC1 du Locle	191
Figure 2.78 : Analyses Factorielles en Composantes Principales sur les pourcentages des paramètres mesurés sur le forage LLC 1	193
Figure 2.79 : Analyses Factorielles en Composantes Principales sur les pourcentages des paramètres mesurés dans les forages LLC1-2 à 5	194

Tableau 2.4 : Calcul des pourcentages moyens des éléments mesurés dans la phase acido-soluble en fonction des faciès sédimentaires rencontrés dans les forages du Locle	195
Figure 2.80 : Caractérisation des argiles silteuses par les données de la géochimie	195
Figure 2.81 : Caractérisation des craies lacustres par les données de la géochimie	197
Figure 2.82 : Caractérisation des gyttjas par les données de la géochimie	197
Figure 2.83 : Reproduction du croisement des deux premiers plans factoriels obtenus en confrontant les données de la géochimie et de la minéralogie	198
Tableau 2.5 : Matrice de corrélation obtenue lors de l'analyse des données de la géochimie	198
Figure 2.84 : Mesures de la teneurs en eau, de la porosité, du Carbone de l'hydrogène et de l'azote dans les sédiments du forage d'Ilay (Profil synthétique)	203
Figure 2.85 : Mesures des éléments de la phase acido-soluble (en pourcents) des sédiments du forage d'Ilay	204
Figure 2.86 : Analyses factorielles en Composantes Principales des données de la géochimie du forage d'Ilay	205
Figure 2.87 : Comparaison des analyses isotopiques faites sur le sédiment total et sur les gastéropodes du forage d'Ilay	206
Figure 2.88 : Analyses isotopiques faites sur le sédiment total des forages d'Ilay : essai de synchronisation et lissage des données avec une moyenne flottante	207
Figure 2.89 : Le cycle du phosphore dans les sédiments et les eaux lacustres	210
Figure 2.90 : Comparaison des fluctuations du niveau lacustre à partir des données malacologiques et sédimentologiques (d'après Magny et al., 1995) et des données isotopiques de l'oxygène 18 (d'après Filippi, 1996)	212
Figure 2.91 : Évolution du détritisme chimique au cours du Pléniglaciaire, du Tardiglaciaire et de l'Holocène	213
Figure 2.92 : Évolution du détritisme chimique au cours du Subboréal et du Subatlantique	215
Tableau 2.6 : Comparaison des pourcentages de chaque éléments majeurs dans les craies lacustres et dans les gyttjas du Locle et d'Ilay	216
Partie 2, Chapitre 5	
Rive nord du lac d'Ilay en direction de l'île (P. Schoellammer, 1994)	215
Figure 2.93 : Fluctuations tardiglaciaires et holocènes du paléolac du Col-des-Roches (NE, CH) à partir des analyses sédimentologiques : résultats préliminaires (d'après M. Magny)	220
Figure 2.94 : Fluctuations tardiglaciaires et holocènes du Paléolac du Col-des-Roches (NE, CH) à partir des analyses malacologiques : résultats préliminaires (d'après les données de J. Mouthon)	221
Figure 2.95 : Comparaison des données de la malacologie et de la sédimentologie	223
Figure 2.96 : Fluctuations tardiglaciaires et holocènes du Paléolac du Col-des-Roches à partir des analyses sédimentologiques et malacologiques (d'après M. Magny et J. Mouthon) comparées aux données régionales (Magny, Ruffaldi, 1995)	225
Partie 3	
Etang du Boffy, Vosges saônoises	231
Figure 3.1 : Essai de corrélation entre les données de la palynologie, de la minéralogie, de la géochimie, de la malacologie, de la sédimentologie et avec les données climatiques régionales et extra régionales	235

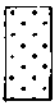
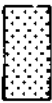
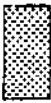
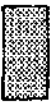
Liste des figures et tableaux

- Figure 3.2 : Essai de corrélation entre les données de la palynologie, de la minéralogie, de la géochimie, de la malacologie, de la sédimentologie et avec les données climatiques régionales, détail du Dryas récent et du début de l'Holocène 237
- Figure 3.3 : Essai de corrélation entre les données de la palynologie, de la minéralogie, de la géochimie, de la malacologie, de la sédimentologie et avec les données climatiques régionales 242

Annexes

N° du Forage	Localisation	date	exécutant	Coordonnées			Profondeur
				X	Y	Altitude	
1	Puits des Rondes	1953	?	546.08	210.94	915	43.4
2	Usine Hesler	5/02/57	Géotechnique De CERENVILLE	546.78	211.61	915.06	15
3	Usine Hesler	5/02/57	Géotechnique De CERENVILLE	546.74	211.64	915.06	20
4	Usine Hesler	5/02/57	Géotechnique De CERENVILLE	546.72	211.58	915	14
5	Station service Reynard	19/07/57	Géotechnique De CERENVILLE	546.45	211.55	916.5	16
6	Station service Reynard	19/07/57	Géotechnique De CERENVILLE	546.45	211.56	916.5	14
7	St 19 rue de France	5/06/54	Géotechnique De CERENVILLE	546.21	211.88	917	22.5
8	Station d'Epuraton	30/08/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.69	211.11	913.7	25.5
9	Station d'Epuraton	2/09/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.67	211.01	918.75	13.5
10	Station d'Epuraton	30/08/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.67	211.05	917.25	25.5
11	Station d'Epuraton	30/08/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.63	211.04	917.6	19
12	Station d'Epuraton	2/09/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.62	211.01	917.2	9.5
13	Station d'Epuraton	2/09/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.57	211	916.6	14.5
14	Station d'Epuraton	2/09/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.6	211.02	918.2	13.5
15	Station d'Epuraton	30/08/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.59	211.06	918.95	26
16	Station d'Epuraton	30/08/65	Géotechnique De CERENVILLE	546.57	211.04	919.65	12
17	Station d'Epuraton	19/06/67	Géotechnique De CERENVILLE	546.59	211	917.45	20
18	Station d'Epuraton	19/06/67	Géotechnique De CERENVILLE	546.56	211.02	918.75	20.2
19	Le Bied	2/06/81	Géotechnique De CERENVILLE	546.12	211.19	913.83	22.3
20	Le Bied	5/06/81	Géotechnique De CERENVILLE	546.43	211.39	913.67	19
21	Le Marais	11/06/81	Géotechnique De CERENVILLE	546.5	211.27	919.55	15
22	Le Bied	22/06/81	Géotechnique De CERENVILLE	546.26	211.32	914.25	30.8
23	Le Marais	24/06/81	Géotechnique De CERENVILLE	546.32	211.19	913.43	14
24	Le Bied	2/07/81	Géotechnique De CERENVILLE	546.09	211.25	913.69	40.2
25	Le Bied	2/08/92	Chrono-ÉCOLOGIE	546.85	211.18	914	40.82
26	Le Bied	2/08/92	Chrono-ÉCOLOGIE	546.43	211.42	914	15.3
27	La Molière	1993/1994	Chrono-ÉCOLOGIE	546.47	211.2	920	5.7
28	Les Calames	1993/1994	Chrono-ÉCOLOGIE	546.92	210.89	920	1.2
29	Rue Georges Favre	11/02/94	MFR Géotechnique SA	546.04	211.73	918.27	15.3
30	Rue Georges Favre	14/02/94	MFR Géotechnique SA	546.02	211.63	919.2	15.5
31	Usine ROLEX	24/11/94	MFR Géotechnique SA	546.7	211.62	915.06	50.2
32	Usine ROLEX	28/11/94	MFR Géotechnique SA	546.69	211.61	915.06	25
33	Usine ROLEX	1/12/94	MFR Géotechnique SA	546.7	211.59	915.06	26
34	Rue de France	1/06/45	Services Industriels	546.55	211.19	920	1.5
35	Rue de France	2/06/45	Services Industriels	546.7	211.7	916	1.5
36	Rue de France	3/06/45	Services Industriels	546.14	211.14	916	4.5
37	Rue de France	4/06/45	Services Industriels	546.24	211.43	916	3.5
38	Rue de France	5/06/45	Services Industriels	546.33	211.33	916	1.9
39	Rue de France	6/06/45	Services Industriels	546.47	211.54	916	4.6
40	Rue de France	7/06/45	Services Industriels	546.66	211.63	916	2
41	Rue de France	8/06/45	Services Industriels	546.78	211.68	916	1.4

Annexe 1 : Liste des forages effectués depuis le début de ce siècle dans le Marais du Col-des-Roches, commune du Locle (Neuchâtel, Suisse)

LE LOCLE (NE, CH)		LOCLE1.SEM	
	HUM		GRA
	RTS		GAS
	RTL		SAG
	RTC		SAB
	TLB		SLA
	TON		ARG
	LTO		RAG
	LCR		RAS
			RLS
	LIS		
	LAG		
			GAC
			LCI
			CAL
			MAR
			GRS
			REM
			VID

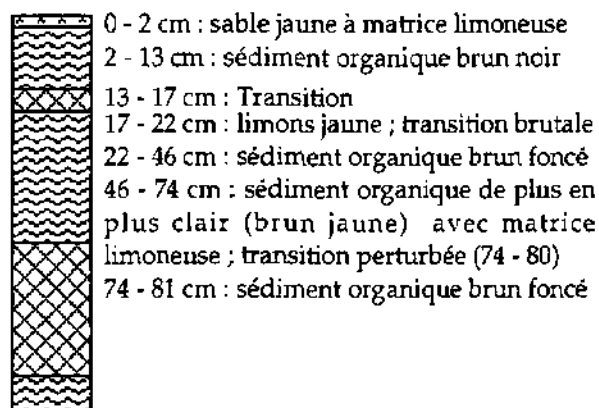
HUM humus naturel, terre cultivée
séquence rythmée de tourbe, limon tourbeux et de limon sableux
RTS séquence rythmée de tourbe et de limon tourbeux
RTC séquence rythmée de tourbe, limon tourbeux et de limon crayeux
TLB tourbe et limon tourbeux à bois
TON tourbe décomposée, brune à noire
LTO limon, tourbeux, brun à noir, avec petits coquillages, ou limon organique noir
LCR limon crayeux, brun à beige, un peu argileux et sableux, à inclusions organiques et coquillages
LIS limon finement sableux, gris beige à olive, à débris organiques et minces veines de tourbe
LAG limon argileux, brun à gris, un peu crayeux, avec gravillons
GRA graviers, gravillons
GAS graviers et gravillons (calcaires ou de pierres mortes) dans une matrice de limon argilo-sableux
SAG sable graveleux un peu limoneux argileux
SAB sable fin
SLA sable limoneux gris
ARG alternance de graviers et gravillons enrobés de limon argileux et limon argileux varvé de sable fin
RAS limon plus ou moins argileux, beige, traces organiques, varves sabilleuses et gravillons
RLS limon et sable fin, peu argileux, varvé, gris beige à gris olive
CAC graviers enrobés de sable et de limon crayeux
LCI limon crayeux induré (pierre morte)
CAL calcaire
MAR marne (brune, rouge, noire, bigarrée)
GRS grès, marnes gréseuses
REM remblai, colluvion, éboulis
VID niveau vide de sédiment, sédiment fluide

 analyse pollinique
 datation radiocarbone

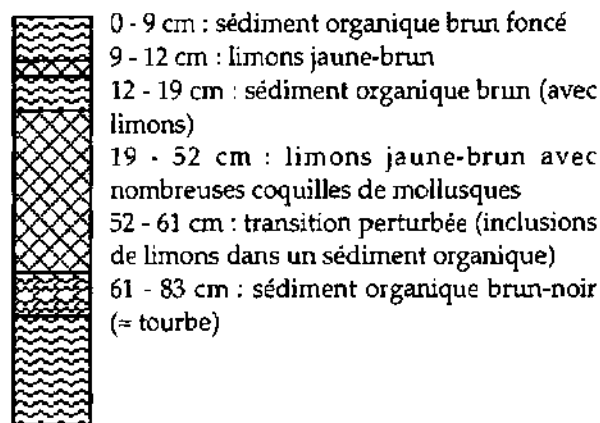
Annexe 2 : Fichier sémiologique

Annexe 3 : Descriptions lithologiques des sédiments du MARAIS du COL-DES-ROCHES
(NE ; CH) 910 m FORAGE LLC1, **Carottier à piston**, descriptions de M. Magny.

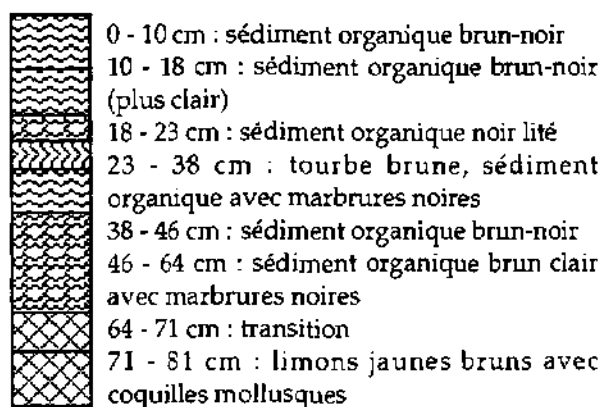
**Carotte n° I : 1 - 2.05 m (Compaction : 23
%, "Manque" : 24 cm)**



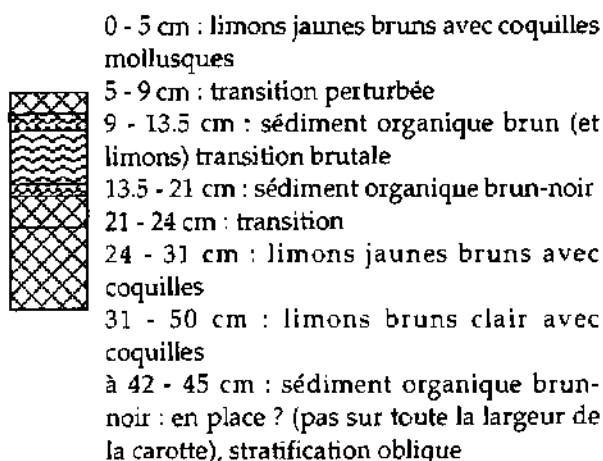
**Carotte n° II : 2.05 - 3.10 m (Compaction
: 21 %, "Manque" : 22 cm)**



**Carotte n° III : 3.10 - 4.15 m
(Compaction : 23 %, "Manque" : 24 cm)**



**Carotte n° IV : 4.15 - 5.20 m
(Compaction : 57 %, "Manque" : 60 cm)**



Annexe 3

Carotte n° V : 5.20 - 6.25 m (Compaction : 37 %, "Manque" : 39 cm)



0 - 15 : sédiment organique brun-noir avec perturbations sur côté de la carotte)
15 - 17 cm : transition perturbée
15 - 20 cm : sédiment organique brun
20 - 29 cm : limons organiques bruns avec coquilles
29 - 40 cm : limons jaunes (avec marbrures brunes)
40 - 55 cm : limons jaunes bruns
55 - 62 cm : sédiment organique brun noir avec lits limoneux et inclusions limoneuse
62 - 66 cm : limons jaunes bruns

Carotte n° VI : 6.25 - 7.30 m (Compaction : 43 %, "Manque" : 45 cm)



0 - 15 cm : limons jaune brun avec éléments végétaux (racines?) et coquilles
15 - 24 cm : limons jaune brun avec coquilles
24 - 36 cm : limons brun (perturbés sur côté)
36 - 39 cm : limons jaune brun
39 - 49 cm : limons brun, présence de lits organiques brun noirs
49 - 60 cm : limons brun jaune (avec marbrures)

Carotte n° VII : 7.30 - 8.35 m (Compaction : 38 %, "Manque" : 40 cm)



0 - 7 cm : limons jaune ; transition nette
7 - 19 cm : sédiment organique brun (avec marbrures) ; transition très nette
19 - 27 cm : sédiment organique brun noir (avec marbrures) ; transition nette
27 - 35 cm : sédiment organique brun avec marbrures
35 - 41 cm : limons jaune
41 - 44 cm : sédiment organique brun-noir
44 - 46 cm : limons jaune
46 - 47 cm : transition
47 - 50 cm : sédiment organique brun noir ; transition nette
50 - 58 cm : limons brun jaune
58 - 59 cm : lit avec organique (brun noir)
59 - 65 cm : limon brun



Carotte n° VIII : 8.35 - 9.40 m (Compaction : 34 %, "Manque" : 36 cm)

0 - 1 cm : tourbe noire
1 - 3 cm : sédiment organique brun
3 - 5 cm : sédiment organique brun-noir
5 - 9 cm : sédiment organique brun ; transition nette
9 - 41 cm : limons jaune avec coquilles
41 - 60 cm : limons jaune un peu foncés avec inclusions organiques ; transition
60 - 69 cm : limon brun clair

Carotte n° IX : 9.40 - 10.45 m (Compaction : 41 %, "Manque" : 43 cm)



0 - 5 cm : limon brun clair
5 - 7 cm : sédiment organique noir
7 - 24 cm : limons brun jaune alternant avec un matériel plus organique noir
24 - 25 cm : lit organique brun-noir (Tourbe)
25 - 35 cm : limon jaune-brun
35 - 50 cm : limon jaune plus granuleux avec intercalations de lits organiques brun-noir
50 - 52 cm : lit organique brun à noir
52 - 62 cm : craie lacustre granuleuse jaune-grise



Carotte n° X : 10.45 - 11.50 m (Compaction : 58 %, "Manque" : 61 cm)

0 - 44 cm : craie lacustre granuleuse jaune-grise

Carotte n° XI : 11.50 - 12.55 m
(Compaction : 43%, "Manque" : 45 cm)



0 - 26 cm : craie lacustre granuleuse jaune grise (6 - 7 cm : niveau de craie lacustre plus claire) ; transition brutale
26 - 41 cm : gyttja crayeuse fine brun clair crayeuse
41 - 60 cm : gyttja organique brun

Carotte n° XII : 12.55 - 13.60 m
(Compaction : 31 %, "Manque" : 33 cm)



0 - 1 cm : perturbé
2 - 22 cm : argiles silteuses grises (glacio-lacustre)
22 - 32 cm : idem avec graviers angles émoussés
32 - 38 cm : argiles silteuses grises
38 - 41 cm : sable (jaune-gris)
41 - 42 cm : argiles silteuses grises
42 - 42.2 cm : sable
42.2 - 72 cm : argiles silteuses grises

Carotte n° XIII : 13.60 - 14.65 m
(Compaction : 32 %, "Manque" : 34 cm)



0 - 2 cm : argiles silteuses grises
2 - 5 cm : sable
5 - 7 cm : sable plus fin avec matrice limoneuse
7 - 21 cm : Lits centimétriques d'argiles silteuses grises avec filets sableux millimétriques
21 - 24 cm : sable
24 - 45 cm : argiles silteuses grises (avec rares filets sableux de quelques mm)
45 - 46 cm : sable
46 - 53 cm : argiles silteuses grises
53 - 67 cm : sable avec gravier (angles émoussés)
67 - 71 cm : argiles silteuses grises

Carotte n° XIV : 14.65 - 15.70 m
(Compaction : 29 %, "Manque" : 30 cm)



0 - 1 cm : argiles silteuses grises
1 - 2 cm : argiles silteuses grises avec sable fin
2 - 5 cm : sable
5 - 15 cm : argiles silteuses grises
15 - 19 cm : sable (transition nette haut et bas)
19 - 41 cm : argiles silteuses grises
41 - 49 cm : argiles silteuses grises avec lits de sable et de graviers dispersés
49 - 75 cm : argiles silteuses grises avec 1 filet de sable mm à 57 cm et 1 filet sable fin à 60 - 61 cm

Carotte n° XV : 15.70 - 16.75 m
(Compaction : 17%, "Manque" : 18 cm)



0 - 2 cm : sable
2 - 21 cm : argiles silteuses grises
21 - 23 cm : sable fin gris
23 - 26 cm : argiles silteuses grises
26 - 41 cm : argiles silteuses grises (avec sable fin dispersé dans matrice argiles silteuses grises)
41 - 46 cm : sable jaune avec graviers et éléments organiques <1mm
46 - 46.5 cm : argiles silteuses grises
46.5 - 49 cm : sable fin avec argiles silteuses grises
49 - 53 cm : argiles silteuses grises avec sable
53 - 56.5 cm : argiles silteuses grises
56.5 - 62 cm : argiles silteuses grises (avec sable fin dans la matrice)
62 - 69.5 cm : sable (avec un peu de argiles silteuses grises) et éléments organiques
69.5 - 72 cm : argiles silteuses grises (avec sable fin)
72 - 74.5 cm : graviers sable (avec argiles silteuses grises)
74.5 - 75 cm : passée argiles silteuses grises
75 - 77 cm : graviers et sable
77 - 84 cm : argiles silteuses grises
84 - 87 cm : argiles silteuses grises (avec sable fin)

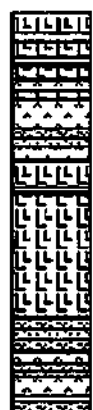
Carotte n° XVI : 16.75 - 17.80 m
(Compaction : 17%, "Manque" : 18 cm)



0 - 3 cm : sable (pollution ?)
3 - 5 cm : argiles silteuses grises
5 - 6 cm : sable fin avec matière organique
6 - 19 cm : argiles silteuses grises
19 - 27 cm : sable fin (avec un peu d'argiles silteuses grises)
27 - 28.5 cm : argiles silteuses grises
28.5 - 31 cm : sable fin (avec très peu de argiles silteuses grises)
31 - 31.5 cm : argiles silteuses grises ; transition nette
31.5 - 41 cm : sable fin
41 - 60 cm : argiles silteuses grises (litée)
60 - 62 cm : sable
62 - 71 cm : argiles silteuses grises
71 - 77 cm : sable fin (avec matière organique)
77 - 87 cm : argiles silteuses grises

Annexe 3

Carotte n° XVII : 17.8 - 18.85 m
(Compaction : 23 %, "Manque" : 24 cm)



0 - 4 cm : argiles silteuses grises
4 - 6 cm : sable (organique au sommet)
6 - 9 cm : argiles silteuses grises
9 - 11 cm : sable fin avec argiles silteuses grises
11 - 13.5 cm : argiles silteuses grises
13.5 - 16 cm : sable fin et graviers à la base
16 - 18 cm : argiles silteuses grises
18 - 23.5 cm : sable
23.5 - 27.5 cm : sable fin avec argiles silteuses grises avec matière organique
27.5 - 31 cm : sable
31 - 36.5 cm : argiles silteuses grises
36.5 - 37 cm : niveau sableux dans argiles silteuses grises
37 - 62 cm : argiles silteuses grises
62 - 69 cm : argiles silteuses grises (avec sable fin)
69 - 71.5 cm : sable avec matière organique
71.5 - 74 cm : argiles silteuses grises avec sable avec matière organique
74 - 78.5 cm : sable
78.5 - 81 cm : argiles silteuses grises avec graviers

Carotte n° XVIII : 18.85 - 19.41 m
(Compaction : 14 %, "Manque" : 8 cm)



0 - 1.5 cm : sable
1.5 - 22.5 cm : argiles silteuses grises (avec quelques inclusions organiques)
22.5 - 24 cm : sable
24 - 33 cm : sable fin avec mottes de argiles silteuses grises dedans
33 - 37 cm : argiles silteuses grises
37 - 40.5 cm : sable fin avec argiles silteuses grises
40.5 - 42 cm : argiles silteuses grises
42 - 43.5 cm : sable fin
43.5 - 48 cm : argiles silteuses grises

PASSAGE EN DESTRUCTIF ENTRE 19.41 ET 19.71 M AVEC UN TRÉPAN POUR TRAVERSER UN NIVEAU TRÈS INDURÉ

Carotte n° XIX : 19.71 - 20.58 m
"manque" 40 cm



0 - 14 cm : argiles silteuses grises avec sable fin avec un filet organique à 6.5 cm
14 - 37 cm : argiles silteuses grises avec 1 filet organique à 20.5 cm avec 2 filets sableux à 24 et 27.5 cm
37 - 41 cm : argiles silteuses grises avec sable fin
41 - 42 cm : argiles silteuses grises
42 - 43.5 cm : sable
43.5 - 46 cm : argiles silteuses grises
46 - 47 cm : sable avec argiles silteuses grises

PRÉLEVEMENT AU CAROTTIER À CABLE À PARTIR DE CETTE PROFONDEUR, LE CAROTTIER À PISTON N'ÉTAIT PLUS UTILISABLE



Carotte n° XX : 20.58 - 21.12 m

- 0 - 1.5 cm : limon jaune
- 1.5 - 3 cm. gyttja crayeuse
- 3 - 8.5 cm : = craie jaune
- 8.5 - 21 cm : limon jaune-gris avec mollusques
- 21 - 34 cm : gyttja très crayeuse
- 34 - 40 cm : limon un peu sableux brun gris
- 40 - 49 cm : argiles silteuses grises

Pollution au moment du forage

Trousse XXa : 21.12 - 21.21 m

- 0 - 3 cm : argiles silteuses grises avec 1 organique brun avec graviers
- 3 - 4 cm : argiles silteuses grises
- 4 - 8.5 cm : sable fin avec limon et matière organique, 1 cailloux (3x4.5 cm)
- 8.5 - 10 cm : argiles silteuses grises avec sable fin
- 10 - 12.5 cm : sable avec argiles silteuses grises et matière organique et graviers

Carotte n° XXI : 22.10 - 22.58 m



- 0 - 20 cm : sable, graviers, argiles silteuses grises avec matière organique
- 20 - 25.5 : argiles silteuses grises
- 25.5 - 32 cm : sable fin avec argiles silteuses grises et 1 filet de argiles silteuses grises à 37 cm
- 32 - 34 cm : sable avec argiles silteuses grises
- 34 - 39 cm : argiles silteuses grises avec sable
- 39 - 45 cm : sable avec filet organique à 41.5 cm
- 45 - 45.5 cm : argiles silteuses grises
- 45.5 - 57.5 cm : sable fin avec argiles silteuses grises et un peu de matériel organique
- 57.5 - 66 cm : argiles silteuses grises (1 cailloux centimétrique à 62.5 cm)

Trousse XXIa : 22.58 - 22.71 m

- 0 - 7.5 cm : argiles silteuses grises avec 3 lits plus sableux et deux intercalations de matériel organique à 2.45 et 6 cm
- 7.5 - 10 cm : sable fin avec argiles silteuses grises et 1 cailloux à cm. 10
- 10 - 10.2 cm : sable jaune



Carotte n° XXII : 22.71 - 22.99 m

- 0 - 26 cm : argiles silteuses grises

Trousse XXIIa : argiles silteuses grises avec 1 cailloux 5x5 cm

Annexe 3



Carotte n° XXIII : 25.11 - 25.60 m

- 0 - 15 cm : sable, graviers, matière organique et limons
- 15 - 17 cm : argiles silteuses grises
- 17 - 17.5 : matière organique avec sable
- 17.5 - 32 cm : argiles silteuses grises
- 32 - 49 cm : graviers et sable, avec filets organiques à 32.5 et à 47.5 cm

Trousse XXIIIa : 25.60 - 25.71 m

- 0 - 4 cm : idem
- 4 - 12 cm : argiles silteuses grises avec filet de graviers et coquilles à 8 cm

Carotte n° XXIV : 26.68 - 27.08 m



- 0 - 29.5 cm : argiles silteuses grises (avec 1 filet sableux organique à 20 cm.)
- 29.5 - 31.5 cm : sable fin avec argiles silteuses grises
- 31.5 - 33 cm : argiles silteuses grises
- 33 - 40.5 cm : sable fin avec limon ; à la base sable avec matière organique

Trousse XXIVa : 27.08 - 27.21 m

- 0 - 8.5 cm : argiles silteuses grises (avec 1 filet organique à 2 cm)
- 8.5 - 10.5 cm : sable avec argiles silteuses grises avec coquilles

Carotte n° XXV : 28.28 - 28.60 m



- 0 - 26.5 cm : argiles silteuses grises (avec sable fin épars)
- 26.5 - 27.5 cm : sable, graviers avec argiles silteuses grises
- 27.5 - 31 cm : argiles silteuses grises
- 31 - 32 cm : sable, graviers (avec argiles silteuses grises)

Trousse XXVa : 28.60 - 28.71 m

- 0 - 4 cm : argiles silteuses grises
- 4 - 5 cm : sable, graviers (avec argiles silteuses grises)
- 5 - 11 cm : argiles silteuses grises

Carotte n° XXVI : 29.68 - 30.07 m

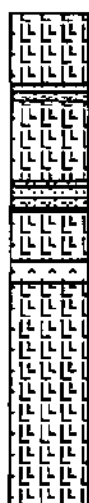


0 - 18 cm : argiles silteuses grises
 18 - 21 cm : argiles silteuses grises avec
 graviers et sable épars, cailloux à 21 cm.
 21 - 31 cm : argiles silteuses grises gris
 crème
 31 - 36 cm : argiles silteuses grises gris
 foncé
 36 - 38 cm : sable, graviers
 38 - 39 cm : argiles silteuses grises gris avec
 sable fin
 39 - 39.3 cm : filet de graviers avec sable
 39.3 - 40.5 cm : argiles silteuses grises avec
 sable fin

Trousse XXVIa : 30.07 - 30.21 m

0 - 4 cm : argiles silteuses grises avec sable fin ;
 transition nette
 4 - 6.5 cm : argiles silteuses grises
 6.5 - 9.5 cm : sable fin avec argiles silteuses grises
 avec 1 filet organique à la base
 9.5 - 14 cm : argiles silteuses grises

Carotte n° XXVII : 30.21 - 30.81 m



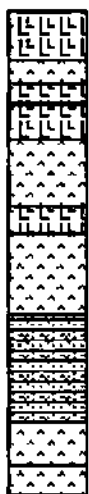
0 - 8.5 cm : argiles silteuses grises
 8.5 - 10.5 cm : argiles silteuses grises avec
 sable et matière organique
 10.5 - 21 cm : argiles silteuses grises avec 2
 niveaux sableux à 10.5 - 12 cm et 15 -
 15.5 cm.
 21 - 24.5 cm : sable avec argiles silteuses
 grises
 24.5 - 30.5 cm : argiles silteuses grises
 30.5 - 33 cm : sable, graviers et coquilles de
 mollusques
 33 - 60 cm : argiles silteuses grises avec 1
 filet sableux à 48 - 49 cm avec argiles
 silteuses grises et 1 filet sableux à 53 - 55
 cm avec argiles silteuses grises

Carotte n° XXVIII : 30.96 - 31.56 m



0 - 5 cm : argiles silteuses grises avec
 quelques sables fin
 5 - 12 cm : sable fin avec matériel
 organique (avec un peu d'organique)
 12 - 15.5 cm : argiles silteuses grises
 15.5 - 18.5 cm : sable fin avec argiles
 silteuses grises (avec matériel organique
 au sommet)
 18.5 - 28 cm : graviers (dont
 centimétrique) avec sable avec matrice
 argiles silteuses grises
 28 - 31.5 cm : idem avec matrice
 développée
 31.5 - 41 cm : sable fin avec filet organique
 à 34 cm.
 41 - 52 cm : argiles silteuses grises avec un
 peu sableux à 44-48 cm et au sommet

Carotte n° XXIX : 31.71 - 32.43



0 - 6.5 cm : argiles silteuses grises
 6.5 - 9.5 cm : sable fin (avec argiles silteuses
 grises)
 9.5 - 11 cm : argiles silteuses grises
 11 - 11.5 cm : sable fin (avec argiles silteuses
 grises)
 11.5 - 16 cm : argiles silteuses grises
 16 - 25 cm : sable avec filets organiques
 25 - 28.5 cm : argiles silteuses grises
 28.5 - 34 cm : sable fin avec filet organique à
 32 cm.
 34 - 39 cm : sable avec nombreux lits organiques
 39 - 54.5 cm : argiles silteuses grises avec lits cm
 de sable fin
 54.5 - 59 cm : sable, graviers et matière
 organique
 59 - 63 cm : sable fin

Trousse XXIXa : 32.43 - 32.57 m

0 - 2 cm : sable fin
 2 - 6 cm : sable, graviers
 6 - 9 cm : sable fin
 9 - 9.5 cm : argiles silteuses grises avec sable fin
 9.5 - 14 cm : sable avec graviers

Annexe 3

Carotte n° XXX : 32.57 - 33.18 m



0 - 3.5 cm : sable fin
 3.5 - 16 cm : argiles silteuses grises (lité avec clair/avec forcé)
 16 - 20.5 cm : sable fin avec un peu de matière organique
 20.5 - 26 cm : argiles silteuses grises avec sable fin
 26 - 28.5 cm : gravier sable ; transition brutale
 28.5 - 50 cm : argiles silteuses grises avec 1 filet sableux à 35 cm et 1 à 38 cm
 50 - 63 cm : argiles silteuses grises avec matériel organique épars

Trousse XXXa : 33.18 - 33.32 m

0 - 13.5 cm : argiles silteuses grises avec matériel organique épars

Carotte n° XXXI : 33.32 - 33.99 m



0 - 54 cm : argiles silteuses grises lité horizontale avec filets sableux organique à 9 cm, 10.5 et 21.5 cm
 54 - 60 cm : sable fin avec 1 niveau d'argiles silteuses grises de 57 à 58 cm.
 60 - 66 cm : argiles silteuses grises (1 filet de sable fin à 61.5 cm)

Trousse XXXIa : 33.99 - 34.07 m

0 - 8 cm : argiles silteuses grises avec niveau sableux à 7 cm

Carotte n° XXXIII : 34.97 - 36.19 m

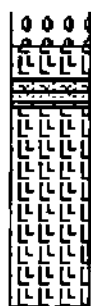


0 - 11 cm : graviers, sable (avec argiles silteuses grises)
 11 - 13 cm : argiles silteuses grises
 13 - 28.5 cm : graviers, sable (organique à cm. 16 - 17)
 28.5 - 36.5 cm : argiles silteuses grises
 36.5 - 43 cm : argiles silteuses grises avec sable épais
 43 - 91 cm : argiles silteuses grises avec matériel organique épars
 91 - 96 cm : sable fin. argiles silteuses grises avec niveau organique à 91.5 et à 93.5 cm ; avec niveau argiles silteuses grises et sable fin à 94 cm
 96 - 119 cm : argiles silteuses grises

Trousse XXXIIIa : 36.19 - 36.32 m

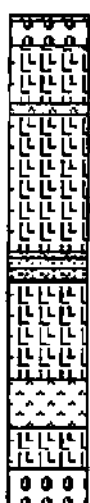
0 - 2 cm : sable (avec organique) ; transition nette
 2 - 13 cm : argiles silteuses grises

Carotte n°XXXII : 34.07 - 34.55 m



0 - 14 cm : cailloux centimétriques, sable avec un peu de matrice argileuse
14 - 17 cm : sable fin avec argiles silteuses grises
17 - 47 cm : argiles silteuses grises avec 1 niveau de sable fin à 21 cm

Carotte n° XXXIV : 38.02 - 39.19 m

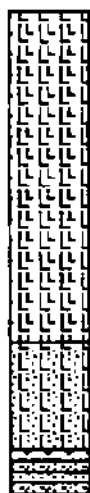


0 - 1 cm : argiles silteuses grises
1 - 7 cm : cailloux
7 - 20 cm : argiles silteuses grises
20 - 22 cm : sable fin avec argiles silteuses grises
22 - 53 cm : argiles silteuses grises (avec 2 niveaux de sable fin à 24 et 26 cm)
53 - 60 cm : sable (avec argiles silteuses grises)
60 - 82 cm : argiles silteuses grises (avec 1 niveau de sable et matériel organique à 63 - 64 cm ; 1 niveau de sable à 71 cm et 1 à 77 cm)
82 - 93 cm : sable (graviers de 85 à 89 cm)
93 - 102 cm : argiles silteuses grises
102 - 111 cm : graviers, cailloux de 1 à 2 cm avec argiles silteuses grises

Trousse XXXIVa : 39.19 - 39.32 m

0 - 10 cm : idem
10 - 13 cm : argiles silteuses grises

Carotte n° XXXV : 40.27 - 40.67 m



0 - 28 cm : argiles silteuses grises avec un peu de sable ; en place?
28 - 37 cm : idem ; en place?
37 - 38 cm : gravier
38 - 41 cm : sable fin avec argiles silteuses grises ; organique à 39 cm.

Trousse XXXVa : 40.67 - 40.82 m

0 - 6 cm : sable fin avec argiles silteuses grises

arrêt du forage sur un niveau induré

Annexe 3

Annexe 3 suite : Description lithologique des sédiments du Marais, forage LLC1-2 face à la gare, carottier russe (M. Magny)

Carotte 1 : 0-100 cm



0-2 cm : craie
2-22 cm : tourbe
22-28 cm : craie organique avec nombreux mollusques
28-55 cm : tourbe
55-100 cm : tourbe crayeuse avec quelques mollusques

Carotte 2 : 100-200 cm



100-117 cm : tourbe crayeuse avec quelques mollusques
117-123 cm : craie organique avec nombreux mollusques à la base, transition nette
123-138 cm : gyttja
138-160 cm : gyttja crayeuse avec nombreux mollusques
160-200 cm : tourbe fibreuse avec fragments de bois

Carotte 3 : 200-300 cm



200-254 cm : tourbe fibreuse avec fragments de bois
254-288 cm : Alternance gyttja fine/tourbe fibreuse
288-300 cm : gyttja crayeuse avec quelques mollusques

Carotte 4 : 300-400 cm



300-330 cm : gyttja crayeuse
330-340 cm : gyttja crayeuse fine et claire (transition nette)
340-350 cm : gyttja crayeuse fine et foncée avec bois de diamètre 1 et 3 cm
350-390 cm : gyttja

Carotte 5 : 400-500 cm



400-434 cm : gyttja crayeuse
434-445 cm : gyttja
445-500 cm : gyttja crayeuse

Carotte 6 : 500-600 cm



500-505 cm : gyttja crayeuse
505-508 cm : gyttja
508-511 cm : gyttja crayeuse
511-512 cm : gyttja
512-523 cm : gyttja crayeuse
523-528 cm : gyttja
528-600 cm : gyttja crayeuse avec quelques mollusques

Carotte 7 : 600-700 cm



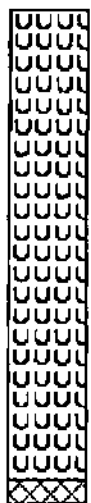
600-663 cm : gyttja crayeuse avec quelques mollusques
 663-682 cm : tourbe fibreuse avec bois
 682-690 cm : gyttja
 690-700 cm : gyttja crayeuse

Carotte 8 : 700-800 cm



700-710 cm : gyttja
 710-714 cm : gyttja crayeuse
 714-718 cm : gyttja avec quelques fragments de bois
 718-721 cm : gyttja crayeuse avec de nombreux mollusques
 721-728 cm : gyttja
 728-730 cm : gyttja crayeuse
 730-740 cm : tourbe fibreuse (transition nette)
 740-744 cm : gyttja
 744-800 cm : craie brune

Carotte 9 : 800-900 cm



800-850 : craie brune (claire)
 850-885 : craie brune (foncée)
 885-900 : craie brune, transition vers gyttja brune

Annexe 3 suite : Description lithologique des sédiments du Marais, forage LLC1-3 face à la gare, carottier russe (M. Magny)

Carotte 1 : 800-850 cm



800-805 cm : gyttja
 805-810 cm : gyttja crayeuse
 810-813 cm : gyttja
 813-837 cm : gyttja crayeuse
 837-839 cm : gyttja
 839-850 cm : Gyttja crayeuse

Carotte 2 : 850-900 cm



850-870 cm : gyttja crayeuse
 870-900 cm : gyttja crayeuse

Annexe 3

Carotte 3 : 900-950 cm



900-913 cm : gyttja crayeuse

913-950 cm : gyttja crayeuse

Carotte 4 : 950-1000 cm



950-970 cm : gyttja crayeuse

970-978 cm : gyttja

978-1000 cm : gyttja

Carotte 5 : 1000-1050 cm



1000-1033 cm : gyttja

1033-1050 cm : craie beige

Carotte 6 : 1050-1100 cm



1050-1100 cm : craie beige

Carotte 7 : 1100-1150 cm



1100-1105 cm : craie beige

1105-1129 cm : craie beige

1129-1132 cm : craie grise

1132-1139 cm : craie brune

1139-1150 cm : craie grise

Carotte 8 : 1150-1200 cm



1150-1170 cm : craie grise

1170-1175 cm : craie beige

1175-1200 cm : craie grise

Annexe 3 suite : Description lithologique des sédiments du Marais, forage LLC1-4, jumeau de LLC1-3
face à la gare, carottier russe (M. Magny)

Carotte 1 : 825-875 cm



825-831 cm : gyttja

831-875 cm : gyttja crayeuse

Carotte 2 : 875-925 cm



875-900 cm : gyttja crayeuse

900-925 cm : gyttja crayeuse

Carotte 3 : 925-975 cm



925-937 cm : gyttja crayeuse

937-964 cm : gyttja

964-970 cm : gyttja

970-975 cm : gyttja

Carotte 4 : 975-1025 cm



975-1000 cm : gyttja

1000-1025 cm : gyttja crayeuse avec
quelques lits organiques

Carotte 5 : 1025-1075 cm



1025-1033 cm : gyttja crayeuse avec
quelques lits organiques

1033-1075 cm : craie beige

Carotte 6 : 1075-1125 cm



1075-1125 cm : craie beige à grise

Annexe 3

Carotte 7 : 1125-1175 cm



1125-1135 cm : craie beige

1135-1175 cm : craie grise

Annexe 3 suite : Description lithologique des sédiments du Marais, forage LLC1-5 face à la gare,
Carottier russe, (M. Magny)

Carotte 1 : 1150-1200 cm



1150-1200 cm : craie grise

Carotte 2 : 1200-1250 cm



1200-1217 cm : craie grise

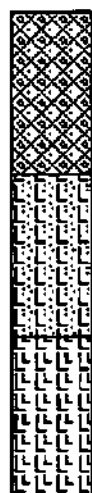
1217-1222 cm : transition vers de la craie grise

1222-1230 cm : passage sableux

1230-1240 cm : gyttja

1240-1250 cm : passage sableux, gyttja

Carotte 3 : 1250-1300 cm



1250-1263 cm : gyttja et sable

1263-1280 cm : Argiles sableuses grises

1280-1300 cm : Argiles fines grises

Annexe 3 suite : Description lithologique des sédiments du Marais, Forage LLC1-6 face à la gare,
Carottier russe, (M. Magny)

Carotte 1 : 1200-1250 cm



1200-1218 cm : craie beige
1218-1229 cm : craie grise
1229-1236 cm : Gytja crayeuse
1236-1244 cm : Sables avec coquilles de mollusques et matière organique
1244-1250 cm : craie brune/ ou Gytja crayeuse à mollusques

Carotte 2 : 1250-1300 cm



1250-1260 cm : craie brune/ ou Gytja crayeuse à mollusques
1260-1280 cm : argiles sableuses grises
1280-1300 cm : argiles fines grises et compactes

Carotte 3 : 1300-1350 cm



1300-1305 cm : sable argileux gris
1305-1314 cm : argiles grises compactes
1314-1315 cm : filet sableux
1315-1350 cm : argiles grises compactes

Annexe 4

Annexe 4 : Descriptions des zones polliniques locales du forage LLC1 du Locle (Neuchâtel, Suisse)

1.1.1. zone pollinique locale 1 (-41 m ; 13 m)

Cette partie du forage est interrompue par de nombreuses lacunes de prélèvement dont il est fait mention au chapitre "Méthodes et Techniques" § 1.2. "les forages récents".

Seules les valeurs de *Pinus* présentent des fluctuations autour de 55 % tout au long de cette zone et dominent le total des pourcentages arboréens ; viennent ensuite *Betula*, *Corylus* puis *Fagus* et *Ulmus*. Les autres taxons arboréens, très variés, ne dépassent que rarement 1 %. Les *Poaceae*, les *Cyperaceae* et *Artemisia* sont les principaux représentants des taxons herbacés. Les herbacées laissent apparaître une variabilité en espèces dans tous les spectres de cette zone 1 (les aquatiques sont quant à elles quasi absentes). Tous ces taxons ne laissent entrevoir aucune tendance significative ; il en résulte un aspect très monotone des courbes. Toutefois, les fluctuations de la courbe de *Pinus* et des principaux taxons A. P. (Arboreal Pollen) et N. A. P. (Non Arboreal Pollen), pourraient permettre d'individualiser 11 sous-zones détaillées ci-dessous :

sous-zone 1a (-40.57 ; -36.32 m)

Pinus varie entre 30 et 40 %, *Corylus* atteint 20 % ; les arbustes sont quasiment absents de même que *Artemisia* et les *Cyperaceae*. Les *Brassicaceae*, les *Caryophyllaceae* et les *Scrophulariaceae* sont au contraire relativement abondantes. Les *Poaceae* dominent avec 10 - 15 % du total N.A.P.

La présence de nombreux taxons comme *Abies*, *Buxus*, *Carpinus*, *Fagus*, *Quercus*, *Picea*, *Ulmus* et *Tilia* avec des valeurs de l'ordre de 2 à 3 %, peut surprendre, mais cette diversité de plantes d'écologie très contrastée suggère ici un abondant remaniement. De plus, certains taxons tertiaires apparaissent de manière plus fréquente, corroborant ainsi l'hypothèse d'un remaniement.

sous-zone 1b (-36.32 ; -34.97 m)

Pinus progresse un peu ; *Betula* (4 - 5 %) et *Corylus* (2 - 3 %) contribuent à l'augmentation du rapport A.P./N.A.P. Les *Cyperaceae* sont plus

fréquents. Les *Apiaceae* sont en cours de développement également. *Ephedra*, *Juniperus*, *Salix* et *Hippophae* sont rencontrés tout au long de ces spectres.

sous-zone 1c (-34.97 ; -32.87 m)

Betula croît significativement pour atteindre 20 %. *Corylus* recule de même que *Pinus* qui chute à 30 % environ. Une légère hausse d'*Artemisia* et des *Poaceae* est observée. Certains taxa herbacés ne sont plus identifiés.

sous-zone 1d (-32.87 ; -31.46 m)

Alors que *Betula* connaît un retour à des valeurs proches de 5 %, *Pinus* se développe considérablement pour atteindre 75 %. Ce retour est accompagné également d'une diversité taxonomique déjà observée précédemment. Les fréquences relatives des *Poaceae* baissent bien qu'elles constituent l'essentiel des herbacées.

sous-zone 1e (-31.46 ; -30.25 m)

Les spectres des herbacées sont composés de 10 % de *Poaceae*, de près de 5 % de *Cyperaceae* et de 2 % d'*Apiaceae* et de *Brassicaceae*. *Pinus* ne constitue plus que 50 % des A.P. ; les autres taxons étant discrets.

sous-zone 1f (-30.25 ; -29.68 m)

Pinus montre une hausse significative de 10 à 15 % ; on remarque chez les *Poaceae* une tendance comparable.

sous-zone 1g (nombreuses lacunes de prélèvement, -29.68 ; -21.15 m)

Pinus domine le total des pollens arboréens ; cette sous-zone est également marquée par l'apparition aléatoire de nombreux taxons.

sous-zone 1h (-21.15 ; -20.50 m) "pollution"

Les arbres et les arbustes dominent essentiellement dans cette sous-zone. *Corylus*, *Ulmus*, *Quercus* augmentent brusquement. À l'opposé, *Pinus* accuse une chute tout aussi importante à 15 %. Les *Poaceae* sont à leurs valeurs les plus basses (environ 5 %).

sous-zone 1i (-20.50 ; -19.29 m)

Les pourcentages des arbres montrent une hausse qui est exclusivement attribuée à *Pinus* ; les arbustes sont peu présents.

sous-zone 1j (-19.29 ; -18.45 m)

Les *Poaceae* se développent assez abondamment et atteignent 25 %. *Artemisia* augmente jusqu'à 10 %. Les *Cyperaceae* dominent également dans les herbacées mais avec 10 % du total. *Pinus* dominant les valeurs des A. P., chute à nouveau à 15 %, puis augmente rapidement à 25 - 30 %.

sous-zone 1k (-18.45 ; -13.57 m)

Pinus croît dans la première moitié de cette zone, recule ensuite de 15 %, puis atteint à nouveau 10 % à la fin de la seconde moitié de la sous-zone. *Betula* montre, quant à lui une courbe en dents de scie, les pourcentages oscillent entre moins de 1 % et 5 - 6 %. *Corylus* et *Ulmus* suivent une évolution comparable, les valeurs de *Fagus* oscillent dans le même sens également. *Artemisia* et les *Poaceae* ne varient pas dans la première moitié de la sous-zone pour progresser significativement ensuite. *Artemisia* atteint 15 % (sa plus forte valeur) suivi des *Poaceae* avec 10 %. Les *Cyperaceae* ont disparu dans ces niveaux.

1.1.2. zone 2 à *Pinus* et *Artemisia* (-13.57 ; -13.28 m)

La zone pollinique locale 2, puis la zone 3, sont communes aux diagrammes 1, 2 et 3. Les herbacées représentent 35 % de la somme totale des pollens. *Artemisia* (maximum 7-8 %) et les *Poaceae* (10 %) sont dominants. *Helianthemum* est régulièrement présent vers 2 %, alors que les autres taxons héliophiles ont des valeurs inférieures à 1 %.

Pinus domine toujours dans le total des pollens arboréens. Les autres arbres sont assez nombreux ; parmi ceux-ci, on note la présence de pollens d'essences mésothermophiles : essentiellement *Tilia*, *Fraxinus*, *Quercus*, *Corylus*, et des mésophiles comme *Abies* et *Fagus*. *Ephedra distachya* et *fragilis* ne dépassent pas 1 % ; *Juniperus* est absent dans ces niveaux.

La limite inférieure de la zone 2 correspond au début du diagramme 3. La limite supérieure coïncide avec la chute d'*Artemisia*.

NB : Sur le diagramme 3, la colonne "varia" contenue dans les taxons arboréens correspond à la somme des pourcentages des différents taxa tertiaires (*Carya*, *Pterocarya*, *Zelkova*, *Tsuga*, *Ostrya*, *Myrica gale*, *Liquidambar*, tertiaires indéterminés)

1.1.3. zone 3 à *Pinus*, *Betula* et *Poaceae* (-13.28 ; -12.53 m)

Pinus augmente significativement pour atteindre sa valeur la plus élevée : 60 % des pollens arboréens ; *Betula* se développe également et passe de 3 à 10 %. *Ephedra* n'est plus repéré ; à l'opposé, *Juniperus* est identifié en début et en fin de zone pour ne quasiment plus être rencontré ensuite.

Les *Poaceae* (15 %) et *Artemisia* (4-5 %) dominent dans la somme des pollens d'herbacées. Les autres héliophiles sont fréquentes sans dépasser 1 %. Les valeurs des *Apiaceae* progressent irrégulièrement.

Les limites de cette zone pollinique sont marquées de part et d'autre par des niveaux stériles.

1.1.4. zone 4 à *Pinus*, *Betula* et *Corylus* (-11.94 ; -11.40 m)

Les pollens d'arbres et d'arbustes sont en très nette augmentation. *Pinus* et *Betula* sont dominants dans le total des pollens arboréens (*Pinus* vers 60 %, *Betula* près de 30 %), ces taxons montrent ensuite un recul bien marqué au profit d'une brusque hausse de *Corylus*. *Ephedra* et *Juniperus* sont absents alors que *Ulmus* présente déjà une courbe continue à environ 2 %. Les *Poaceae* régressent mais constituent la majorité des herbacées. *Artemisia* recule, les autres héliophiles ne sont plus identifiées dans cette zone.

La limite inférieure est fixée par un recul brutal de *Betula*. La limite supérieure coïncide avec la chute de *Pinus* et l'augmentation brusque de *Corylus*.

1.1.5. zone 5 à *Corylus*, *Ulmus*, *Quercus* et *Pinus* (-11.40 ; -10.25 m)

Les valeurs des pollens d'arbres oscillent aux alentours de 90 %. *Corylus* constitue l'essentiel des pollens arboréens (60 %) accompagné d'*Ulmus* et de *Quercus* qui se

Annexe 4

développent tous deux rapidement et atteignent leurs valeurs maximales (de l'ordre de 20 % pour *Ulmus* et 12 % pour *Quercus*). *Fraxinus* est maintenant plus fréquent comme *Tilia*, *Acer* et *Alnus* qui cependant, disparaissent dans la seconde moitié de la zone. Les valeurs de *Betula* sont à nouveau très basses, voisines de 2 %. En début de zone, *Pinus* ne constitue plus que 10 % des A.P. puis régresse en fin de zone. Les N.A.P. sont surtout constituées par les *Poaceae* et les *Cyperaceae* ; les héliophiles sont maintenant absentes des spectres polliniques à l'exception d'*Artemisia* qui n'est plus rencontré que sporadiquement.

La limite inférieure de la zone est marquée par un premier retrait d'*Ulmus* et une nouvelle hausse de *Corylus*. La limite supérieure est repérée grâce à la hausse brusque d'*Ulmus* et *Quercus*.

1.1.6. zone 6 à *Corylus*, *Ulmus* et *Quercus* (-10.25 ; -9.57 m)

Corylus constitue encore l'essentiel des A.P. puisque ses pourcentages augmentent de 10 % au détriment de ceux d'*Ulmus*. Dans le même sens, les valeurs de *Quercus* baissent légèrement. À l'opposé, *Tilia* se développe et dessine désormais une courbe presque continue. *Alnus* est de nouveau observé dans les spectres. Des apparitions répétées de *Fagus* sont notées dans la première partie de la zone. Les pourcentages de N.A.P. progressent régulièrement de la base au sommet de la zone. Les *Cyperaceae* dominent avec les *Poaceae*. Les héliophiles sont de nouveau plus fréquentes (*Artemisia*, *Helianthemum*, *Chenopodiaceae*), comme les *Apiaceae* et les *Ranunculaceae*.

La limite inférieure de la zone se reconnaît au début de la courbe continue de *Tilia*. La régression brusque de *Corylus* marque la fin de la zone.

1.1.7. zone 7 à *Corylus* et *Quercetum-Mixtum* (-9.57 ; -7.36 m)

Les valeurs des pollens d'arbres et arbustes diminuent fortement devant l'accroissement des fréquences de pollens d'herbacées, dominées par les *Cyperaceae*. Les *Poaceae* sont en légère progression. Les *Apiaceae* atteignent leur développement maximum. Les plantes hygrophiles (*Sparganium* par exemple) sont plus fréquentes.

On observe un retrait constant de *Corylus* jusqu'à 10-15 %. *Fraxinus* se développe de manière spontanée, il était peu présent au cours de la zone précédente. L'optimum de *Tilia* est atteint. Dans la seconde moitié de cette zone, *Alnus* présente une courbe continue (environ 5 %) ; la présence de *Picea* et d'*Abies* est notée dans cet intervalle. *Hedera* apparaît de manière significative à cette période.

La limite inférieure de la zone se traduit par le développement brusque de *Fraxinus*. La limite supérieure coïncide avec le retrait de ce taxon et la hausse de la courbe continue d'*Abies*.

1.1.8. zone 8 à *Abies* et *Fagus* (-7.36 ; -5.50 m)

La limite A.P./N.A.P. se stabilise vers 60 %. Les herbacées sont toujours dominées par les *Cyperaceae* accompagnées des *Poaceae* qui montrent un pic au début de la zone pour diminuer régulièrement ensuite. Les *Apiaceae*, toujours en courbe continue, donnent des pourcentages plus modestes (2 à 3 %) ; à l'inverse les *Ranunculaceae* se développent nettement. Les pollens de plantes hygrophiles et des aquatiques atteignent dans cette zone leurs maxima. Une phase de croissance régulière et importante d'*Abies* est observée. Parallèlement, *Fagus*, de façon moins marquée, croît. Dès le début de la seconde moitié de la zone, *Picea* présente une courbe continue (3 à 4 %) alors que sa présence n'était que sporadique dans la première moitié. On peut remarquer une opposition des tendances entre les courbes d'*Abies* et de *Fagus* au sommet de la zone ; *Abies* régresse à la faveur du développement de *Fagus* qui atteint son optimum (20 %). *Corylus* se retire toujours régulièrement comme les taxons de la Chênaie-Mixte (*Ulmus*, *Quercus*, *Fraxinus* et *Tilia*).

La limite inférieure est repérée par le début de la courbe continue d'*Abies* dont les valeurs dépassent 2 %. La limite supérieure correspond au retrait de *Fagus* et de *Fraxinus*.

1.1.9. zone 9 à *Abies*, *Picea* et *Fagus* (-5.50 ; -3.36 m)

Les fréquences polliniques relatives des arbres et des arbustes sont en hausse ; elles atteignent 70 % voire 90 % ponctuellement. *Picea* est dominant avec 50 % du total des A.P. Les augmentations des valeurs A. P. coïncident avec

les variations des hausses des pourcentages d'*Abies*, de *Fagus* et/ou de *Picea*. Le recul de *Corylus* perdure, de même que celui des éléments du *Quercetum-Mixtum*. Les herbacées sont toujours dominées par les *Cyperaceae* ; les *Poaceae* varient beaucoup dans la seconde partie de cette zone. Parallèlement, les premières traces d'une activité humaine sont décelées. Les *Poaceae* de type *Cerealina* sont assez fréquents, et accompagnés de plantes rudérales (*Plantago lanceolata* et *major/media*, *Rumex* et les *Rubiaceae*). Certaines héliophiles sont plus abondantes.

La limite inférieure de la zone se traduit par le développement de *Picea* et une reprise d'*Abies*. La limite supérieure se reconnaît au brusque effondrement des valeurs de *Picea* et d'*Abies*.

1.1.10. zone 10 à *Picea*, *Fagus* et *Carpinus* (-3.36 ; -2.00 m)

Le taux des arbres chute à 60 %. *Picea* recule très fortement à 10 % alors que *Fagus* a une attitude opposée. *Abies* et *Alnus* montrent des courbes décroissantes. *Ulmus*, *Tilia* et *Acer* sont devenus rares dans les spectres. Dès le début de la zone, une nouvelle essence forestière est identifiée : *Carpinus* qui ne dépasse pas 1 %. Dans les spectres des herbacées, encore dominées par les *Cyperaceae*, on observe un retour important des *Poaceae*. Les *Poaceae* de type *Cerealina* sont surtout présents en début de zone ; les plantes messicoles et rudérales sont plus rares dans ces niveaux. On observe également un regain de développement des *Ranunculaceae*, des *Apiaceae* et de certaines héliophiles comme par exemple *Helianthemum*, *Thalictrum*...

La limite inférieure de la zone correspond à l'apparition de *Carpinus*. La limite supérieure est caractérisée par le début de la courbe continue de cette nouvelle essence arborée.

1.1.11. zone 11 à *Picea*, *Abies*, *Carpinus* et *Juglans* (-2.00 ; -1.13 m)

Le pourcentage des pollens arboréens passe de moins de 60 à plus de 80 %. Cette tendance correspond à une recrudescence de *Picea* (55 %) et d'*Abies* (15-20 %). Désormais, *Fagus*, *Alnus* et *Betula* régressent. A l'inverse, *Pinus* et *Corylus* montrent une légère hausse. Dans cette zone pollinique, *Juglans* apparaît avec des valeurs inférieures à 1 %. *Carpinus* dessine une courbe continue sur toute la zone sans

dépasser toutefois 5 %. Les N.A.P. sont dominées par les *Poaceae* et les *Cyperaceae* (10 % environ). Les indices polliniques d'anthropisation (*Poaceae* de type *Cerealina*, *Plantago lanceolata*, *Rumex*, *Chenopodiaceae*) sont plus faibles.

La limite inférieure coïncide avec le début de la courbe continue de *Carpinus*. La limite supérieure est fixée par le sommet du diagramme.

1.2. DESCRIPTION DES ZONES POLLINIQUES LOCALES DES FORAGES LLC1-2 À LLC1-5

Le diagramme 4 (planche 2.14, hors-texte) est un diagramme synthétique construit à partir des analyses du forage LLC 1-2, des forages jumeaux LLC 1-3 et 4 et des forages LLC 1-5 et LLC 1-6 (annexes n° 3) réalisés à environ 2 m de LLC1.

1.2.1. Zone 1 à *Pinus* (- 13.45 ; - 13.17 m)

Pinus est le principal représentant des taxons arboréens, ses pourcentages sont inférieurs à 50 %. *Juniperus* (2.5 %) et *Betula* (2 %) l'accompagnent. Le taux des taxons tertiaires dépasse 20 %. Les plantes herbacées sont surtout représentées par les *Poaceae*, *Artemisia* et d'autres héliophiles.

1.2.2. Zone 2 à *Pinus*, *Artemisia* et *Betula* (- 13.17 ; - 12.80 m)

Les herbacées représentent 20 à 25 % du total et sont constituées essentiellement par les *Poaceae* et des héliophiles strictes (*Artemisia*, *Thalictrum*, *Potentilla*, *Helianthemum*, *Plantago montana* ainsi que les *Chenopodiaceae*, les centaurees, *Apiaceae* et *Filipendula*). *Pinus* (60 à 70 %) constitue, avec *Betula* (15 à 20 %), la majorité des A.P. ; *Ephedra* est absent ; *Hippophae* et *Juniperus* sont peu fréquents. *Ulmus*, *Quercus*, *Tilia* et *Acer*, taxons mésothermophiles, ont des pourcentages inférieurs à 1 %, *Corylus* atteint 1 à 2 %. Des pollens de *Carya*, *Pterocarya*, *Zelkova*, *Carpinus* (2 à 3 %) sont encore identifiés à la base de cette zone. La présence de *Poaceae* de grosses tailles, de type *Cerealina* (1,5 % environ) est à remarquer également dans cette zone pollinique.

Annexe 4

1.2.3. Zone 3 à *Juniperus*, *Betula*, *Poaceae* et *Artemisia* (- 12.75 ; - 12.55 m)

Les spectres sont dominés par les *Poaceae* (13 %), *Artemisia* (4 %) et les herbacées héliophiles (*Potentilla*, *Helianthemum*, *Thalictrum*...). Les herbacées représentent de 30 à 40 % de la somme pollinique totale. Seuls *Rumex*, les *Apiaceae*, les *Poaceae* de type *Cereal* et *Filipendula* ont des pourcentages supérieurs à 1 %. *Pinus* et *Betula* sont les principaux pollens arboréens. Les valeurs de *Pinus* passent à moins de 50 % pour toute cette zone. *Betula* reste modeste vers 15 %. *Juniperus* est très bien représenté (environ 10 %). *Ephedra* et *Hippophae* sont plus discrets (moins de 1 %)

1.2.4. Zone 4 à *Juniperus* et *Cyperaceae* (- 12.55 ; - 12.35 m)

Les *Cyperaceae* caractérisent cette zone pollinique et atteignent 12 % des herbacées ; les *Poaceae*, *Artemisia*, les *Apiaceae* et *Filipendula* arrivent en second plan. Les héliophiles sont encore présentes, mais leurs pourcentages sont bas (moins de 1 %). Les pollens arboréens sont dominés par *Pinus* (= 48 %) et par *Betula*, dont les valeurs atteignent 15 % ; par contre *Juniperus* semble régresser (5 %). En fin de zone, les pourcentages de *Cyperaceae* ainsi que ceux des *Apiaceae* et de *Filipendula* diminuent. Le rapport A.P./N.A.P. oscille entre 60 et 80 %. Les taxons mésothermophiles sont représentés par *Corylus* et *Quercus*. *Ulmus*, *Tilia* et *Acer* réapparaissent après un bref recul au cours de la zone précédente. Les taxa tertiaires régressent également.

La limite supérieure de cette zone est déterminée par la hausse des pourcentages de *Pinus*, *Betula* et la régression de *Juniperus*.

1.2.5. La zone 5 à *Pinus* (- 12.35; 12.15 m)

La tendance observée au niveau des pourcentages de *Pinus* se poursuit, ce taxon atteint maintenant ses pourcentages les plus élevés : environ 70-80 % du total. La courbe de *Betula* est marquée par un creux avec des valeurs à 5 %. *Juniperus* reste en dessous de 1 %. *Hippophae* est identifié mais de manière irrégulière.

Le taux d'*Artemisia* est très bas. *Potentilla*, *Helianthemum* et les centaurees disparaissent. Les *Poaceae* restent au voisinage de 10 %. Les

Apiaceae et *Filipendula* régressent ; des *Poaceae* de grosses tailles, de type *Cereal*, sont rencontrés aléatoirement.

1.2.6. Zone 6 à *Pinus*, *Betula* et *Poaceae* (- 12.15 ; - 11.95 m)

Cette zone est caractérisée par une augmentation de *Betula* (15 à 20 %) et un recul de *Pinus* à 50 %. On remarque également une récurrence d'*Artemisia* (maximum 3-4 %), des *Poaceae* (8-10 %) et de *Potentilla* (moins de 1 %).

Alors qu'en début de zone, les pourcentages d'arbres sont à leur maximum, le taux de *Pinus* diminue jusqu'à 50-52 %. La fin de la zone se traduit par une hausse du taux de *Pinus* (60 %). *Corylus*, dessine désormais une courbe continue inférieure à 3 % ; *Quercus* et *Ulmus* sont sporadiques.

1.2.7. Zone 7 à *Pinus*, *Betula* et *Corylus* (- 11.95 ; - 11.55 m)

Pinus et *Betula* sont encore dominants dans cette zone, et représentent 65 % à 70 % du total des A.P. *Juniperus* et *Hippophae*, encore présents en début de zone, disparaissent ensuite. La croissance régulière de *Corylus* caractérise également cette zone pollinique. *Quercus*, qui se manifestait déjà dans tous les spectres, atteint désormais 3 % au terme de cette zone. Il est devancé par *Ulmus* avec près de 5 % du total des A. P. Le taux des herbacées marque un net recul par rapport à la zone 6. Parmi les héliophiles, seul *Artemisia* subsiste avec 1,5 %.

La limite inférieure correspond à une augmentation de *Pinus* et une chute de *Betula*. La limite supérieure coïncide avec le recul brutal de *Betula*.

1.2.8. Zone 8 à *Pinus* et *Corylus* (- 11.55 ; - 11.25 m)

Les valeurs des herbacées chutent régulièrement à moins de 10 %. Les héliophiles sont plus sporadiques. *Artemisia* présente des pourcentages inférieurs à 1 %. *Betula* régresse de manière continue ; à l'opposé *Corylus* augmente considérablement pour atteindre 48 % au sommet de la zone. *Pinus* régresse de 50 à 10-15 %. *Ulmus* atteint, avec ses 20 %, quasiment ses valeurs maximales ; *Quercus* n'atteint que 5 % en fin de zone.

1.2.9. Zone 9 à *Corylus*, *Ulmus*, *Quercus* et *Pinus* (- 11.25 ; - 10.45 m)

Le pourcentage des pollens d'arbres oscille entre 92 et 97 %. *Corylus* est prédominant avec un taux maximal compris entre 60 et 75 %. *Ulmus* et *Quercus* sont les principaux représentants du *Quercetum-Mixtum* dans cette zone où ils atteignent respectivement 20 % et 14 %. *Tilia* reste sporadique. *Fraxinus* apparaît ponctuellement. *Pinus* stagne vers 8-10 %.

La quasi totalité des héliophiles a disparu des spectres polliniques, seul *Artemisia* est identifié sporadiquement. Les très rares herbacées sont représentées par les *Poaceae*, *Rumex*, les *Apiaceae*, les *Ranunculaceae* et *Filipendula*.

1.2.10. Zone 10 à *Corylus*, *Ulmus*, et *Quercus* (- 10.45 ; - 9.80 m)

Corylus qui constitue encore l'essentiel des pollens arboréens diminue légèrement de 75 à 62 %. *Ulmus* montre des pourcentages voisins de 20 % et *Quercus* des valeurs de 10-12 %. Le taux de *Tilia* laisse apparaître une courbe maintenant continue et voisine de 1,5 % ; le développement régulier d'*Acer* reste inférieur à 1 % ; La présence de *Fraxinus* (moins de 1 %) s'observe au sommet de la zone. *Pinus* atteint un seuil de 5 % sans plus vraiment le dépasser. *Fagus* apparaît sporadiquement dans cette zone. *Hedera* est présent dans tous les spectres.

Les herbacées sont rares, représentées par les *Poaceae* (2 %), les *Apiaceae*, les *Ranunculaceae* et *Filipendula*. Les *Cyperaceae* tendent à augmenter régulièrement.

La limite inférieure correspond à la baisse des valeurs de *Corylus* et à une chute des pourcentages d'*Ulmus* et de *Pinus*. La limite supérieure est fixée par le développement brusque de *Fraxinus* coïncidant avec la régression majeure de *Corylus*.

1.2.11. Zone 11 à *Corylus* et *Quercetum-Mixtum* (- 9.75 ; - 8.60 m)

Le *Quercetum-Mixtum* est dominant et constitue avec *Corylus* l'essentiel des A.P. qui atteignent des valeurs proches de 75 % du total. Les pourcentages de *Corylus* indiquent un recul quasi constant pour arriver à 20 % à la fin de la zone pollinique. A l'opposé, *Fraxinus* passe de

moins de 1 % à 15 % de manière irrégulière. *Quercus* tend à augmenter dans la seconde partie de cette phase alors qu'*Ulmus* stagne. *Tilia* passe par un maximum (7 %), puis régresse. *Acer*, en l'espace de quelques spectres montre une courbe de l'ordre de 2-3 %. *Viburnum*, *Sambucus*, *Hedera* sont encore rencontrés. Les premières apparitions de *Picea* et d'*Abies* sont relevées au cours de cette zone.

Les herbacées sont très diversifiées, elles sont surtout représentées par les *Cyperaceae* (14 %) ; les *Apiaceae* atteignent en fin de zone des valeurs proches de 7 %. On observe également une augmentation des *Ranunculaceae* (= 2 %). La présence répétée de *Poaceae* de grosses tailles, de type *Cerealia* caractérise cette zone pollinique.

1.2.12. Zone 12 à *Fraxinus*, *Ulmus*, *Corylus* et *Quercus* (- 8,50 ; - 7,90 m)

Les valeurs des pollens d'arbres et d'arbustes oscillent entre 70 et 75 %. L'optimum de *Fraxinus* se situe entre 25 et 30 %. *Quercus* recule assez fortement jusqu'à 2-3 %. Le taux d'*Ulmus* opère, dès la fin de la zone 11, une régression constante suivie ensuite également par *Corylus*. *Alnus*, jusqu'à présent très discret, montre une courbe continue voisine de 1 %. Dans cette zone deux occurrences de *Fagus* et une d'*Abies* sont observées.

Les valeurs des *Cyperaceae* poursuivent l'augmentation qui a débuté au cours de la zone 10, ils atteignent 15 à 20 %. Les *Apiaceae*, *Ranunculaceae* et *Filipendula* régressent. Les autres taxons sont peu abondants. Les *Poaceae* de grosses tailles, de type *Cerealia*, sont encore présents au début de cette zone.

1.2.13. Zone 13 à *Fraxinus*, *Corylus*, *Abies* et *Fagus* (- 7.90 ; - 7.30 m)

Fraxinus et *Corylus* reculent nettement alors que *Ulmus* et *Quercus* diminuent plus progressivement. *Alnus* dessine maintenant une courbe continue avec des valeurs voisines de 5 %. On remarque une recrudescence de *Pinus* et des *Poaceae* ; les *Poaceae* de type *Cerealia* sont à nouveau rencontrés dans ces niveaux accompagnés de *Plantago lanceolata*. Les taxons herbacés sont peu diversifiés ; les mieux représentés sont les herbacées aquatiques (*Sparganium*, *Nuphar*, *Nymphaea*...) et les herbacées présentes dans la végétation riveraine du lac (*Filipendula*, *Ranunculaceae*, *Apiaceae*...). Les

Annexe 4

Cyperaceae tendent à augmenter de la base au sommet de la zone en faisant baisser le rapport A.P./N. A. P.

La limite inférieure correspond à la chute rapide de *Fraxinus*. La limite supérieure coïncide à la stabilisation des valeurs d'*Abies* aux environs de 5 %.

1.2.14. Zone 14 à *Abies* et *Fagus* (- 7.30 ; - 6.20 m)

Les arbres et les arbustes progressent de 75 à 80 % avec un stade à 50 %. *Abies* et *Fagus* connaissent leur plein essor avec une valeur de 30 % pour *Abies* et de 14 % pour *Fagus*. La Chênaie-Mixte régresse considérablement. *Ulmus* passe en dessous de 5 %, *Tilia* en dessous de 2 %. Le taux de *Corylus* reste voisin de 10 %. *Picea* se développe, disparaît puis réapparaît définitivement pour atteindre 3-4 %.

Les herbacées sont surtout représentées par les *Cyperaceae* qui reculent de la base au sommet de la zone, et par les taxons aquatiques (*Potamogeton*, *Sparganium*, *Typha*). Les *Poaceae* atteignent 10 % au début de la zone pour régresser de manière continue. Des indices polliniques traduisant une activité humaine (*Cerealia*, *Plantago lanceolata*...) sont encore plus fréquents ici.

1.2.15. Zone 15 à *Abies*, *Picea* et *Fagus* (- 6.20 ; - 2.90 m)

Cette zone pollinique locale peut être scindée en 5 sous-zones. Le taux de pollens arboréens est toujours supérieur à 70 %. *Picea* est dominant avec *Abies* et *Fagus*. *Alnus* est régulièrement représenté (4-5 %).

- sous-zone 15 a (- 6.20 ; - 5.40 m)

On assiste à une croissance continue du pourcentage de *Picea* ; les valeurs de *Fagus* sont relativement stables. Le taux d'*Abies* varie beaucoup dans cette zone. La courbe de *Fraxinus* montre une décroissance continue ; *Tilia* est rencontré dans tous les niveaux mais avec des pourcentages inférieurs à 1 %. Au début de cette zone, on remarque une réapparition de *Juniperus*. Les herbacées sont dominées par les *Cyperaceae*, les *Ranunculaceae* et *Potamogeton*.

- sous-zone 15 b (- 5.40 ; - 4.80 m)

Dans cette sous-zone, seules les herbacées plus ou moins inféodées aux milieux humides et aquatiques sont bien représentées. Quelques occurrences de pollens de *Poaceae* de type *Cerealia* sont relevées alors qu'ils étaient presque absents des niveaux précédents. On peut remarquer l'absence de pollens d'arbustes dans ces niveaux. *Carpinus* est de nouveau identifié ponctuellement ; *Fraxinus* montre toujours une courbe décroissante.

- sous-zone 15 c (- 4.80 ; - 3.90 m)

Les spectres montrent une diversification des pollens des plantes herbacées et des arbustes. Des occurrences de pollens de *Poaceae* de type *Cerealia* sont observées en début et en fin de sous-zone. *Picea* montre une importante croissance alors que *Fagus* atteint des valeurs relativement basses. Vers la fin de la sous-zone, les courbes de ces deux taxons s'inversent. Les taux de *Fraxinus* continuent à décroître ; les pourcentages de *Quercus* sont au contraire relativement stables (10 %) depuis le début de la zone 15.

- sous-zone 15 d (- 3.90 ; - 3.40 m)

Le contenu pollinique de cette sous-zone est comparable à celui de la sous-zone 15 b. Les herbacées y sont peu diversifiées et les arbustes sont presque absents.

- sous-zone 15 e (- 3.40 ; - 2.90 m)

Les forts pourcentages de *Picea* et les valeurs très basses de *Fagus* permettent de caractériser cette sous-zone. *Tilia* n'est plus identifié depuis la sous-zone 15 d. Les pourcentages de *Fraxinus* et d'*Ulmus* sont maintenant inférieurs à 1 %. La courbe de *Pinus* montre une légère augmentation. La courbe des *Poaceae* de type *Cerealia* est continue ; les rudérales (*Rumex*, *Rubiaceae*, *Plantago major/media*) commencent à se développer. Les plantes aquatiques et les hygrophiles ne sont plus abondamment rencontrées.

La limite inférieure correspond à un recul brutal d'*Abies*, la limite supérieure est fixée avec une chute des pourcentages de *Picea*.

1.2.16. Zone 16 à *Fagus*, *Picea* et *Carpinus* (- 2.90 ; - 2.10 m)

Les valeurs des arbres et arbustes chutent vers 60 %. *Fagus* est dominant avec *Picea*, lequel présente un pic à 49 % au début de la zone puis chute brutalement. la courbe des pourcentage de *Fagus* évolue de manière inverse à celle de *Picea*. Le pourcentage de *Carpinus* présente désormais une courbe quasi continue. On assiste à une certaine récurrence des pourcentages de *Betula*, *Ulmus*, *Tilia* et *Fraxinus* mais également de *Pinus* et *Juniperus*. Les pollens d'arbustes sont plus fréquemment identifiés que dans les sous-zones 15 d et e.

Les valeurs des *Poaceae* progressent pour marquer des pics à 7 - 8 %. Les *Cyperaceae* dominent toujours. Dans cette zone les indices polliniques d'anthropisation sont fortement représentés. Les *Poaceae* de type *Cerealia* montrent des valeurs voisines de 2 %. Les rudérales sont nettement plus fréquentes qu'au cours de la zone précédente. *Nuphar*, *Nymphaea*, *Typha* sont rarement dénombrés dans les spectres de cette zone.

Le croisement des courbes de *Picea* et *Fagus* fixe la limite inférieure de cette zone. La limite supérieure correspond à une légère progression de *Fagus*, d'*Abies* et d'*Ulmus* et à une nette régression de *Picea*.

1.2.17. Zone 17 à *Picea*, *Abies*, *Carpinus* et *Juglans* (- 2.10 ; - 1.30 m)

Les pourcentages des arbres et arbustes se stabilisent vers 60-65 %, sauf en fin de zone où ils augmentent jusqu'à 75 % ; cette hausse est due principalement à l'augmentation des pourcentages de *Picea* et d'*Abies* et à une légère hausse des pourcentages de *Pinus*. *Carpinus* dessine une courbe continue vers 2,5 %. Les quelques apparitions de *Juglans* (moins de 1 %) caractérisent cette zone. Les *Poaceae* de type *Cerealia*, toujours en courbe continue au début de la zone, diminuent régulièrement à la fin de celle-ci. Les rudérales (*Rumex*, *Chenopodiaceae*, *Rubiaceae*, *Plantago major/media*) restent toutefois bien marquées comme les messicoles. Dans la seconde moitié de la zone, on note l'absence de pollens de plantes hygrophiles et aquatiques.

Annexe 5

Annexe 5 : Descriptions lithologiques du forage LLC2 du Marais du Col-des-Roches, carottier à piston, descriptions M Magny (1992)



Carotte 1 : 0-155 cm
(Compaction 37 % ; manque 58 cm)

0-8 cm : limons argileux (remblais actuels)

8-97 cm : tourbe brun (baguettes vers 52 cm et 25 cm)



Carotte 2 : 155-260 cm
(Compaction 14 % ; manque 15 cm)

0-46 cm : tourbe brun

46-51 cm : tourbe plus claire (crayeuse)

51-90 cm : tourbe brun



Carotte 3 : 260-365 cm
(Compaction 58 % ; manque 44 cm)

0-32 cm : tourbe brun

32-43 cm : tourbe brun plus foncé

43-61 cm : tourbe brun noir



Carotte 4 : 365-470 cm
(Compaction 45 % ; manque 47.5 cm)

0-39 cm : idem. Bois à 39 (1 cm de diamètre)

39-42 cm : tourbe plus claire

42 cm : transition brutale

42-52 cm : tourbe brun

52-78 cm : tourbe brun noir. Deux lits plus limoneux vers 54 et 57,5.



Carotte 5 : 470-575 cm
(Compaction 18 % ; manque 19 cm)

0-26 cm : tourbe brun noir

26-56 cm : tourbe brun avec marbrures

56-86 cm : tourbe brun noir (baguettes à 62 et 70)



Carotte 6 : 575-680 cm
(Compaction 34 % ; manque 36 cm)

0-6 cm : idem

6-29 cm : tourbe brun

29-50 cm : limons plus organiques : transition progressive

50-65 cm : limons coquillers bruns
65-69 cm : sable à peu près sans matrice



Carotte 7 : 680-785 cm
(Compaction 30 % ; manque 32 cm)

0-9 cm : sable idem, Transition brutale

9-73 cm : limons bruns, plus 22 coquilles.



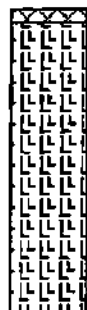
Carotte 8 : 785-890 cm
(Compaction 24 % ; manque 25 cm)

0-80 cm : limons bruns (passée organique à 41/50)



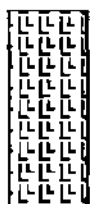
Carotte 9 : 890-995 cm
(Compaction 9 % ; manque 15 cm)

0-38 cm : idem
38-61 cm : idem plus brindilles «flottées» dispersées
61-64 cm : limons plus sables
64-65 cm : limons bruns
65-66,5 cm : lit de sable
66,5-79 cm : limons plus sable et graviers dispersés



Carotte 10 : 995-1100 cm
(Compaction 58 % ; manque 61 cm)

0-2 cm : limons bruns
2-15 cm : limons argileux gris beige (quelques graviers vers 8 cm)
15-44 cm : limons argileux gris beige plus graviers et cailloux épars.



Carotte 11 : 1100-1280 cm
(dessus pollué : limons bruns 0-3 cm)
0-40 cm : idem plus cailloux plus gros (5 à 10 cm)



Carotte 12 cm : 1280-1340 cm

0-6 cm : limons gris beige
6-14 cm : Cailloux 3-4 cm plus matrice limoneuse
14-19 cm : Cailloux 3-4 cm sans matrice

Carotte XIV. 13,40-13,80 m

Cailloux

Carotte XV. 13,80-14,9 m

Cailloux

fond : 14,9-15,30

Cailloux

Annexe 6. Descriptions des analyses ponctuelles du forage LLC2

Seuls quelques échantillons ont été traités afin de replacer les changements de faciès dans un cadre paléoenvironnemental local établi à partir des deux précédents forages. Les résultats sont présentés dans la figure 2.15, sous la forme d'histogrammes car le pas d'échantillonnage est très lâche. Le diagramme présenté, permet de distinguer 3 zones polliniques. Les descriptions du forage LLC2 est en annexe n° 4.

1.3.1. la zone 1 à *Pinus* et tertiaires (vers - 10 m de profondeur)

Le pourcentage de *Pinus* représente 65 % du total des pollens d'arbres. Les indices d'une végétation à feuillage caduc, au niveau régional, sont très nets : *Quercus*, *Ulmus* et *Tilia* ont des valeurs inférieures à 1 % ; *Corylus* commence à se développer. Un pourcentage non négligeable de pollens d'âge tertiaire est enregistré. Cette zone peut être attribuée au Pléniglaciaire.

1.3.2. la zone 2 à *Pinus* et *Corylus* (vers - 9 m de profondeur)

Cette zone se distingue de la précédente par le démarrage de la courbe de *Corylus*

parallèlement à la diminution de *Pinus*. Bon nombre des éléments du *Quercetum-Mixtum* montrent des courbes déjà continues. Les *Poaceae* croissent ; les *Cyperaceae* affichent un développement plus important. Cette zone peut être attribuée au Boréal.

1.3.3. la zone 3 à *Corylus* et *Quercetum-Mixtum* (vers - 6 m de profondeur)

Pinus ne figure désormais plus parmi les représentants majoritaires des taxons arboréens contrairement à *Corylus* qui persiste depuis la zone précédente. *Quercus*, *Fraxinus*, *Ulmus*, *Tilia* se développent à la fin du diagramme. Les *Poaceae* sont peu abondantes (moins de 5 %), à l'opposé les *Cyperaceae* prospèrent (entre 25 et plus de 40 % du total des pollens d'herbacées). Les *Apiaceae* montrent également un pic au cours de cette zone alors que les spores monolètes sont assez abondantes dans ces niveaux. Ces caractéristiques permettent de rattacher cette zone à l'Atlantique ancien.

Annexe 7 : Description lithologique des sédiments du Lac d'Ilay (Jura, France, Carottier russe,
par M. Magny



Carotte I : 0-50 cm

0-6 cm : niveau organique
6-35 cm : craie jaune avec mollusques
35-38 cm : mélange craie jaune et matière organique figurée
38-42 cm : gyttja
42-48 cm : gyttja crayeuse
48-50 cm : craie jaune avec mollusques



Carotte II : 20-70 cm

0-40 cm : craie jaune avec mollusques
40-48 cm : gyttja
48-55 cm : gyttja crayeuse avec mollusques
55-60 cm : poche de gyttja crayeuse dans craie jaune
60-70 cm : craie jaune à mollusques



Carotte III : 70-120 cm

70-120 cm : craie jaune avec mollusques



Carotte IV : 120-170 cm

120-170 cm : craie jaune avec mollusques

Annexe 8

Annexe 8 : Descriptions des zones polliniques locales du forage 2 du site d'Illay (Jura, France)

2.1.1. Zone 1 à *Fagus*, *Abies* et *Poaceae* (-168, -106 cm)

Les valeurs des arbres et des arbustes dominent dans cette zone avec des taux compris entre 75 et 82 % du total. *Fagus*, *Abies* et *Alnus* présentent les pourcentages les plus élevés des pollens arboréens. Les herbacées sont représentées essentiellement par les *Poaceae* (5 à 10 %), les *Poaceae* de type *Cerealia* et les rudérales.

Les fluctuations des courbes de *Fagus*, d'*Abies* et des *Poaceae* amènent à distinguer 5 sous-zones :

- 1a : sous-zone à *Fagus*, *Poaceae* et *Artemisia* (- 168, - 158 cm). Elle est caractérisée par une augmentation de *Fagus*, d'*Alnus* et un recul d'*Abies* de près de 7 % au profit des *Poaceae*. *Artemisia* atteint sa plus forte valeur. Les *Poaceae* de type *Cerealia* diminuent sensiblement. Les rudérales (*Plantago major/media*, *Rubiaceae*, *Rumex*...) sont peu représentées.

- 1b : sous-zone à *Fagus* et *Corylus* (- 158, - 142 cm). *Fagus* augmente de 5 à 6 %. Les pourcentages de *Picea* croissent légèrement de 1,5 % ; les premiers pollens de *Carpinus* et de *Juniperus* sont présents dès la fin de cette sous-zone. Les taux des *Poaceae* décroissent légèrement ; les *Cerealia* montrent une faible hausse. *Artemisia* n'apparaît plus que sporadiquement. Les autres herbacées sont essentiellement représentées par des taxons rudéraux et aquatiques.

- 1c : sous-zone à *Abies* et *Fagus* (- 142 cm, - 124 cm). Une hausse des valeurs d'*Abies* (de 20 à 35 %) caractérise cette zone pollinique. *Juniperus* et *Carpinus* disparaissent. Les valeurs des *Poaceae* augmentent faiblement.

- 1d : sous-zone à *Alnus* et *Quercus* (- 124, - 112 cm). Les pourcentages des arbres et des arbustes, bien que dominants dans les spectres polliniques, régressent au début et en fin de zone. *Abies* et *Fagus* reculent. A l'opposé, *Quercus* et *Alnus* augmentent de 5 % environ. *Juniperus* ainsi que *Carpinus* sont présents tout au long de la sous-zone.

- 1e : sous-zone à *Quercus*, *Poaceae*, *Plantago lanceolata* (- 112, - 106 cm). Cette sous-zone montre une baisse du taux de pollens arboréens touchant principalement *Abies*, *Picea* et *Pinus*. A l'opposé, les pourcentages des herbacées sont en progression, et notamment ceux des *Poaceae* et de *Plantago lanceolata*. Ces événements sont contemporains de deux avancées des *Poaceae*, des *Cerealia*, de *Plantago lanceolata*, d'*Artemisia* et de *Rumex*. Les *Poaceae* diminuent de près de 10 % en fin de sous-zone.

La limite inférieure de celle-ci est fixée par le début du diagramme. La limite supérieure coïncide avec la chute des *Poaceae* et l'augmentation d'*Abies* et de *Carpinus*.

2.1.2. Zone 2 à *Fagus*, *Alnus* et *Carpinus* (- 112, - 52 cm)

Les arbres et les arbustes sont dominants dans cette zone, leurs taux varient autour de 90 %. *Carpinus* montre désormais des valeurs continues proches de 2 %, voire 5 %. Les premières occurrences de *Juglans* sont observées dans la première moitié de la zone. *Juniperus* est en courbe discontinue. Les *Poaceae* dominent les herbacées. Les *Poaceae* de type *Cerealia* régressent et ne sont plus régulièrement identifiés en début de zone, puis dessinent de nouveau une courbe continue au sommet de la zone comme *Plantago lanceolata*. *Plantago major/media* s'observe dans la première partie de la zone alors qu'il en est absent dans la seconde. Les autres herbacées sont peu fréquentes.

La limite inférieure de la zone est définie par la chute des *Poaceae* et le début de la courbe continue de *Carpinus*. La limite supérieure est déterminée par l'apparition quasi permanente de *Juglans* et la chute d'*Abies*.

2.1.3. Zone 3 à *Fagus* et *Alnus* (- 52, - 26 cm)

Les pollens d'arbres et arbustes oscillent autour de 85 %. Les herbacées sont rares et représentées essentiellement par les *Poaceae* (de 3 à 7 %), les *Cerealia*, *Plantago lanceolata*, *Plantago major/media*, *Artemisia*, *Rumex* et les *Chenopodiaceae*.

Deux sous-zones peuvent être distinguées :

- **3a : sous-zone à *Fagus* (- 52, - 42 cm).**

Cette sous-zone est caractérisée par l'apparition répétée de *Juglans*. *Carpinus* connaît un léger recul de même qu'*Alnus*. *Fagus* progresse légèrement. *Abies* tend à se développer. Le pourcentage des *Cyperaceae* augmente dans la seconde moitié de la sous-zone.

- **3b : sous-zone à *Alnus* et *Corylus* (- 42, - 26 cm).**

Le pourcentage d'*Alnus* croît jusqu'à 25 % au détriment de celui de *Fagus* qui recule fortement. Le taux de *Corylus* augmente également de manière significative vers 15 %. *Juglans*, présent tout au long de la sous-zone, ne dépasse pas 1 %. *Juniperus* présente une courbe discontinue. Le taux des *Poaceae* augmente au cours de cette phase ; les *Poaceae* de type *Cerealina*, *Plantago lanceolata* et *major/media* ont des courbes interrompues. Les *Cyperaceae* régressent dans la première moitié de cette sous-zone.

La limite inférieure de la zone 3 correspond à l'apparition de *Juglans* alors que la limite supérieure est déterminée par la régression de *Corylus* et d'*Abies*.

2.1.4. Zone 4 à *Fagus* et *Carpinus* (- 26, - 12 cm)

Les taxons arboréens dominant, mais passent de 90 à 82 % environ. Les herbacées sont surtout dominées par les *Poaceae*, les *Poaceae* de type

Cerealina et le cortège des taxons messicoles et rudéraux comme les plantains, les *Chenopodiaceae*, *Rumex*, les *Apiaceae*... Les plantes aquatiques sont davantage représentées dans cette zone (*Sparganium* en particulier). *Fagus*, de même que *Abies* connaissent un net accroissement. Celui de *Carpinus* est plus discret. *Alnus* régresse régulièrement.

La limite inférieure coïncide avec la recrudescence de *Fagus* et d'*Abies*. La limite supérieure est caractérisée par la chute de *Fagus* et la hausse de la courbe des *Poaceae*.

2.1.5. Zone 5 à *Corylus* et *Poaceae* (- 12, - 1 cm)

Les arbres et les arbustes atteignent leurs valeurs les plus basses (vers 70 %), toutefois les taux de certains taxons arboréens se augmentent significativement (*Corylus*, *Pinus*, *Picea*, *Juniperus*) ; *Fraxinus* au contraire, disparaît brusquement. *Cannabis/Humulus* se développe pour atteindre 5 %. Les pourcentages de *Carpinus* régressent. Les *Poaceae* (10 %) constituent près de la moitié des valeurs des herbacées. Le taux de *Plantago lanceolata* connaît une croissance non égalée jusqu'ici. Les pollens de *Plantago major/media*, *Artemisia*, les *Apiaceae*, *Rumex*, *Chenopodiaceae*, *Rubiaceae*, *Urticaceae*, *Sanguisorba minor* sont identifiés dans tous les spectres avec des valeurs inférieures à 1 %.

La limite inférieure correspond à l'augmentation des *Poaceae* et de *Cannabis/Humulus* et à la chute brutale de *Fraxinus*. La limite supérieure correspond à la fin du diagramme pollinique.

Annexe 9

Annexe 9 : Tableau des concentrations polliniques absolues dans les sédiments du forage LLC 1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH)

Niveau	JUNIFERUS	BETULA	PINUS	CORYLUS	ALBES	ARBUSTES	HERMACEES	CYPERACEAE	BRASSICACEAE	POACEAE	ARTEMISIA	APIACEAE	FILIPENDULA
1284	0	156	2497	125	2916	31	1045	227	0	399	46	54	78
1299	8	163	2250	269	2925	16	1165	252	0	318	97	0	57
1313	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
1328	0	32	728	12	305	9	473	73	334	118	138	6	19
1343	0	28	639	55	841	39	493	71	9	95	131	26	11
1357	0	38	468	2	555	12	238	32	6	75	34	4	8
1364	0	15	379	30	519	25	306	18	34	68	26	11	3
1375	0	114	889	269	1647	98	1041	151	0	208	74	26	80
1390	0	55	1070	83	1317	27	381	66	10	83	145	11	16
1404	0	12	169	1	188	2	83	13	16	14	22	3	4
1434	0	150	795	66	1349	74	897	102	8	112	112	37	48
1449	0	49	574	76	779	46	498	65	0	104	60	16	0
1464	0	192	753	184	1249	48	1128	120	10	248	200	9	16
1469	0	31	532	78	778	20	285	36	31	67	26	5	26
1479	0	82	1929	154	2749	50	1906	336	5	237	206	10	41
1493	0	33	397	2	496	14	269	46	0	49	38	8	11
1507	10	15	736	46	917	33	429	97	0	127	25	15	10
1521	8	13	473	22	581	29	254	44	13	71	22	4	8
1535	5	65	1141	47	1332	10	507	39	40	137	53	5	17
1549	0	23	930	148	1384	58	771	162	10	111	69	23	18
1563	0	17	1915	37	2109	60	738	122	0	151	96	55	37
1582	0	28	590	33	776	16	351	16	0	70	53	16	16
1594	29	87	1776	58	1493	78	830	87	19	228	65	7	80
1606	0	48	686	73	951	32	589	82	69	128	43	4	19
1618	0	84	1452	36	1732	48	1260	156	0	192	120	24	60
1630	8	44	435	11	534	27	261	26	19	98	20	2	5
1642	4	30	785	9	964	26	308	13	78	73	13	13	41
1654	13	40	1714	378	2522	119	1538	263	19	499	54	67	0
1667	0	7	478	16	551	35	302	36	33	99	46	2	12
1687	3	8	449	32	561	37	286	20	48	113	41	7	2
1699	0	23	1849	47	2037	15	561	127	11	215	31	15	0
1711	0	11	220	17	319	4	254	20	40	82	11	11	14
1723	0	0	523	19	626	17	231	43	2	159	14	4	4
1747	9	19	989	19	1049	22	336	38	4	53	73	9	14
1759	17	60	1104	200	1691	77	1039	208	6	104	173	69	0
1772	3	20	715	35	860	15	714	117	1	280	117	15	15
1784	0	21	496	14	616	10	220	14	0	84	32	3	10
1793	10	25	399	51	370	33	230	10	11	40	30	25	10
1806	0	20	410	34	511	5	190	23	13	24	37	4	5
1832	10	82	312	16	527	20	449	54	49	99	71	38	16
1845	0	42	365	16	474	19	376	60	23	100	58	9	2
1858	0	18	72	48	234	36	359	61	0	59	56	10	16
1907	18	18	1195	18	1365	67	1742	144	0	516	157	0	37
1929	6	26	1319	6	1487	24	488	104	17	189	39	6	13
1941	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0
1951	0	25	497	32	673	30	488	36	2	140	76	24	4
1971	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1973	0	20	709	9	811	27	302	32	13	71	24	6	6
1975	0	35	1493	8	1692	20	616	88	0	237	71	6	8
1989	0	264	7595	131	9054	187	4255	377	0	2078	377	37	0
2008	0	45	803	46	1067	41	594	69	3	157	64	0	40
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
2026	0	93	1899	202	2518	61	2086	404	13	455	171	93	46
2045	0	5	733	106	1030	35	481	106	4	76	3	15	7
2054	0	7	69	19	132	7	79	16	0	16	3	0	0
2060	0	306	905	2574	3576	80	1342	831	23	292	55	35	13
2068	0	921	2463	7295	16464	327	5073	2542	188	1400	405	36	157
2078	0	82	539	1503	3423	27	807	442	6	132	13	41	4
2088	0	1139	5384	5419	17163	537	5164	2275	16	910	248	248	372
2098	0	758	5084	5685	15820	180	2250	1221	4	472	168	254	311
2105	29	407	2445	1135	5947	151	2934	1082	18	436	378	116	203
2115	0	63	290	45	524	18	243	27	8	45	18	0	18
2124	0	11	421	28	576	30	228	30	3	45	0	0	11
2129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2130	11	74	1033	45	1184	21	478	91	0	171	45	17	0
2140	0	33	312	13	649	24	376	26	12	154	67	20	7
2150	0	23	107	11	263	0	124	7	2	36	11	7	7
2160	3	16	244	33	348	6	230	20	42	87	6	10	0
2170	6	22	342	16	395	6	384	38	97	142	80	9	0
2176	0	40	1214	30	1444	40	663	10	45	131	91	20	0
2261	14	14	493	7	552	24	417	53	0	157	67	10	0
2261	13	22	1269	37	1526	53	856	151	4	220	113	37	0
2299	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0
2311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2313	0	1	67	2	74	0	23	3	0	7	2	7	8
2323	4	4	258	12	346	8	169	12	23	49	12	8	0
2331	7	16	194	30	263	13	193	7	64	51	35	7	4
2341	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0
2371	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2668	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0
2670	13	8	337	19	411	33	239	11	26	58	84	16	0
2688	32	263	5523	164	6145	130	3801	295	8	756	624	98	0
2710	2	2	60	2	65	2	35	3	41	13	0	0	0
2721	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0
2826	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0
2830	3	3	216	7	227	3	50	11	6	24	15	3	2
2838	3	10	556	7	519	12	185	35	59	65	26	0	0
2844	8	16	713	2	765	13	149	5	49	92	8	0	0
2853	0	23	268	8	313	4	221	23	64	64	40	6	0
2863	0	3	260	15	287	1	101	9	20	29	31	1	1
2871	0	0	0	0	0	0	0	0	144	0	0	0	0
2886	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
2973	1	2	113	3	120	1	57	6	15	29	3	0	0
2973	565	1755	22400	83	24903	1586	12945	2173	13	668	2591	668	0
2983	0	34	378	7	418	4	185	22	11	63	18	11	4
2998	0	159	1236	3	1422	30	196	18	74	109	3	12	13

Annexe 9 (suite) : Tableau des concentrations polliniques absolues dans les sédiments du forage LLC1 pour la tranche (-41, 12 m) du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH), le Pléniglaciaire

Niveau	JUNIPERUS	BETULA	PINUS	CORYLLUS	ARBRES	ARBUSTES	HERBACEES	CYPERACEAE	BRASSICACEAE	POACEAE	ARTEMISIA	APIACEAE	FILIFENDULA
3003	54	206	2331	34	2783	101	1525	493	8	539	22	45	11
3007	0	48	216	24	300	0	96	24	20	24	0	0	0
3015	10	135	1480	21	1667	15	697	129	58	291	48	16	27
3025	16	25	1074	33	1173	24	518	33	87	198	63	29	0
3031	0	32	1435	8	1555	24	739	147	60	180	57	57	23
3041	0	49	604	34	696	13	339	34	2	133	39	29	0
3061	7	28	389	23	456	13	139	13	13	42	23	5	2
3071	15	15	876	93	1122	129	624	70	148	140	46	39	0
3079	0	30	380	5	448	10	197	8	9	65	21	19	2
3081	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
3096	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0
3098	0	51	820	32	965	0	268	32	23	55	51	15	13
3136	0	10	652	50	1125	20	562	60	0	162	40	30	20
3145	6	27	441	13	525	12	297	24	29	90	17	17	13
3156	0	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	0	0
3171	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
3173	0	244	1536	78	1963	27	703	78	14	283	68	9	9
3181	26	122	1394	43	1704	51	1079	156	5	357	61	61	8
3239	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
3267	4	53	603	44	739	8	245	24	16	78	44	14	9
3274	0	177	2596	255	3519	135	1524	216	18	531	59	59	78
3281	0	97	2143	68	2518	47	680	146	16	243	19	19	19
3287	0	160	1474	78	1896	33	1151	167	30	323	55	33	89
3297	36	338	1790	72	2248	168	1064	193	19	495	84	24	24
3307	6	67	623	29	746	19	225	74	0	74	4	6	9
3317	24	587	1256	106	2077	128	996	122	28	416	57	65	40
3319	41	287	479	5	763	73	393	65	0	153	65	5	10
3334	5	5	381	6	402	8	43	9	18	13	0	0	0
3342	9	246	605	15	982	54	380	40	44	129	55	15	18
3352	3	52	356	4	388	3	35	7	188	11	7	0	0
3362	17	482	565	17	1136	69	390	95	29	220	65	17	11
3372	10	73	265	7	369	11	100	10	0	30	7	2	4
3382	18	166	258	36	522	22	339	31	93	146	18	20	20
3392	0	16	460	65	621	80	241	32	65	32	0	32	16
3396	46	544	985	162	2035	148	1057	162	5	417	127	34	69
3399	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3407	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3422	3	129	870	21	1039	13	509	140	0	140	46	10	3
3427	0	291	2003	171	2737	68	956	188	41	428	102	34	17
3437	0	127	156	29	383	6	239	19	0	74	24	7	13
3447	8	90	243	60	400	16	283	16	58	126	27	16	8
3453	5	79	122	7	215	7	144	9	36	39	18	5	9
3455	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0
3497	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3499	1	33	182	47	338	11	131	15	45	58	15	5	1
3509	2	90	375	2	506	8	214	26	20	49	24	7	4
3527	8	30	181	26	258	23	223	17	9	70	13	11	0
3541	0	22	515	14	355	2	203	32	16	76	23	24	2
3547	9	27	157	14	232	24	230	29	12	68	21	12	0
3558	10	161	479	10	745	70	556	75	20	161	45	25	20
3567	0	82	686	294	1653	165	1240	294	14	248	22	7	37
3578	2	20	166	12	201	16	92	6	30	32	3	7	2
3587	3	16	289	13	346	3	307	69	0	106	26	6	0
3597	0	10	204	16	262	0	141	12	0	39	12	2	0
3607	0	41	249	26	330	4	230	28	1	55	7	10	2
3615	0	17	137	23	200	0	138	10	4	39	15	5	8
3621	5	15	168	11	201	5	116	5	25	48	5	4	4
3632	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3802	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3812	4	29	214	17	281	30	194	27	0	44	14	9	4
3822	0	14	60	8	101	0	63	11	16	17	8	1	0
3843	0	4	244	38	415	0	358	25	460	68	0	4	13
3852	0	6	384	45	588	6	688	45	6	97	19	13	0
3862	0	6	71	52	250	0	159	19	0	6	13	6	0
3872	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3903	0	6	149	14	194	0	102	9	2	9	0	14	4
3915	0	0	73	73	164	0	126	18	5	36	0	0	0
3932	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
4027	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0
4057	0	18	137	37	312	31	265	78	3	56	14	9	18

Annexe 10 et 12 : Description des concentrations absolues en fonction des Zones polliniques locales des forages LLC1 et LLC 1 à 5 du Locle

1.5.3. Le diagramme synthétique LLC1-2 à 5

Les concentrations polliniques totales montrent peu de variations et confirment la zonation pollinique proposée (figure 2.18, page 134).

- zones polliniques locales 3 et 4 (LLC1-5) :

Les sédiments sont également des argiles silteuses. Les F.P.A. atteignent 5000 grains/gr.

dans la zone 3. Ce sont surtout les taux de *Betula*, *Salix* et *Juniperus* qui sont responsables des valeurs enregistrées.

- zone pollinique locale 5

Elle est enregistrée dans un sédiment organo-sableux et présente de fortes concentrations absolues, près de 25.10³ grains/gr. de sédiment. L'abondance de *Pinus* coïncide avec des valeurs élevées de ses pourcentages.

Annexe 10-12

- zone pollinique locale 6

Les F.P.A. chutent à 5000 grains/gr. en moyenne. *Pinus* et *Betula* reculent alors que *Corylus*, *Ulmus* et *Quercus* progressent. Le sédiment est un sable crayeux.

- zone pollinique locale 7

Elle est enregistrée dans de la craie lacustre ; les F.P.A. sont alors de nouveau en progression. *Corylus*, *Ulmus*, *Quercus* dominent face au retrait de *Pinus*. Les F.P.A. sont ici en opposition avec les pourcentages.

- zones polliniques locales 8, 9, 10

Les concentrations polliniques totales diminuent, passant de 20.10^3 à près de 2.10^3 grains/gramme. La craie lacustre semble pauvre en pollens dans la zone 7 alors que les pourcentages montrent une hausse régulière de *Corylus* et une régression de *Pinus*. Une nouvelle opposition apparaît dans la zone pollinique 8 qui affiche deux maxima de *Corylus* alors que ses concentrations sont faibles. La hausse maximale des concentrations polliniques se fait au début de la zone 9 coïncidant avec un changement de sédimentation (passage craie/gyttja).

- zone pollinique locale 11

Les concentrations polliniques totales diminuent, elles sont toujours dominées par celles des arbres et des arbustes ce qui témoigne de la densité du couvert forestier.

- zone pollinique locale 12

Une brusque hausse des F.P.A. passant de 7.10^3 à 50.10^3 caractérise cette zone pollinique. Cette hausse est attribuable aux forts pourcentages de *Fraxinus* et à sa forte concentration : 12.10^3 grains/gr. pour 35.10^3 grains/gr. de pollens d'arbres ; *Fraxinus* colonise peut être le fond de la vallée. La seconde moitié de cette zone correspond à un recul des F.P.A. coïncidant avec l'apparition d'une sédimentation devenant tourbeuse.

- zone pollinique locale 13

Les fréquences polliniques absolues totales montrent une évolution comparable pour pratiquement tous les taxons rencontrés à

l'exception d'*Abies* et de *Fagus*. Autrement, les valeurs sont plus faibles au début et en fin de zone.

- zone pollinique locale 14

La sédimentation organo-crayeuse avec des passées tourbeuses a conservé près de 10 à 15.10^3 grains de pollens/gr. de manière à peu près constante. Le remplacement du *Quercetum-Mixtum* par la hêtraie-sapinière est très net et progressif, comme l'immixtion de *Picea*.

- zone pollinique locale 15

A la transition marquée gyttja/tourbe à 5.50 m, les F.P.A. diminuent d'abord puis progressent ensuite lorsque la sédimentation perd un peu sa caractéristique tourbeuse. Les F.P.A. atteignent un maximum de 30.10^3 à 4 m puis chutent brutalement à 5.10^3 dans le sédiment tourbeux. Le taux de sédimentation semble diminuer également du fait de l'atterrissement.

- zone pollinique locale 16

Les F.P.A. varient peu (environ 5 à 7.10^3 grains/gr.). Les niveaux de tourbe et de gyttja se succèdent. Les F.P.A. de *Salix* reculent du début à la fin de la zone passant de 5.10^2 à 1.10^2 grains/gr.. A l'opposé, *Carpinus* progresse de 40 à 200 grains/gr.. *Artemisia* réapparaît, les *Ranunculaceae* forment un pic. Ces indices paraissent indiquer l'installation de lambeaux de ripisylves et de prés humides avoisinants (*Ranunculaceae*, *Filipendula*), alors que les autres taxons attestent au niveau régional de l'intensification de la pression humaine sur le couvert végétal.

- zone pollinique locale 17

La sédimentation est tourbeuse ; les F.P.A. chutent en dessous de la barre des 5.10^3 grains/gr.. Au sommet du profil, une opposition s'observe entre les pourcentages croissants de *Picea*, d'*Abies*, des *Cyperaceae* et leurs concentrations respectives.

Annexe 11 : Tableau des concentrations polliniques absolues dans les sédiments des sondages jumeaux LLC1-2, LLC1-3/4 et LLC1-5 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH)

N°spp	ARABIS	BEICULA	PONIS	CORYLUS	ULMUS	QUERCUS	ERAGINUS	HELIA	ACER	ALNUS	FAGUS	PICEA	CARPINUS	DIGLANS	BUNIPERUS	SALIX	HIPPOCRATIS	BARBIS	ARISTIDES	HEURES	NUCCAR	LYTHRACEAE	ELIPHSIRIA	APOLLINAR	ARTENIA	CEREAIA	CHENOPODIACEAE	RUBIACEAE
130	351	5	46	93	11	58	29	15	0	105	35	609	5	3	13	5	0	1532	22	371	58	316	5	5	11	17	5	11
141	363	23	152	223	23	117	11	0	0	58	117	1021	35	0	11	23	0	2143	34	1015	70	833	11	0	11	11	0	11
150	182	0	100	109	36	82	0	0	0	78	7	276	35	0	0	0	0	2143	34	965	34	276	27	0	0	27	0	0
160	119	19	139	438	70	398	19	39	0	318	139	1056	0	0	39	19	0	2183	76	1128	119	637	17	0	0	0	19	59
175	420	118	227	313	52	192	52	0	0	315	946	70	0	0	17	0	0	3535	51	2327	122	1297	17	17	0	35	0	0
185	963	246	221	345	49	517	187	0	24	403	887	1098	197	0	24	0	0	5763	97	2927	345	1840	0	24	0	143	0	0
195	863	383	335	623	47	479	95	0	26	348	845	1113	187	13	26	13	0	4716	39	3094	311	1486	23	0	0	239	0	47
205	550	281	147	389	53	630	134	0	0	479	767	1198	187	13	26	13	0	4716	39	3094	311	1486	23	0	0	239	0	47
210	124	30	61	183	41	330	20	10	0	113	92	607	41	0	20	10	0	1412	40	713	121	400	10	30	20	0	30	0
220	353	43	167	318	83	355	62	0	20	52	614	211	33	0	20	0	0	1455	0	347	85	158	103	0	0	62	0	0
230	145	46	19	66	19	211	13	0	0	52	614	211	33	0	20	0	0	1455	0	347	85	158	103	0	0	62	0	0
240	641	173	197	395	24	517	24	0	28	295	813	813	70	0	0	0	0	3766	147	2680	246	1257	0	24	0	49	0	0
250	769	511	145	603	20	918	208	0	0	372	1811	978	20	0	13	26	0	6427	81	3171	239	1804	20	0	41	0	0	0
260	243	117	78	248	26	366	39	26	13	169	694	805	52	0	13	26	0	2866	39	1343	326	230	0	30	13	78	0	26
270	833	51	51	154	17	616	102	17	0	205	873	924	0	0	0	154	0	3849	154	902	136	239	0	0	17	51	0	51
280	365	28	65	140	9	103	0	0	0	178	225	514	16	0	0	0	0	1639	18	550	93	364	0	0	0	0	0	0
290	457	16	145	242	22	129	0	0	0	325	114	844	0	0	22	302	0	2935	32	338	0	226	0	0	0	16	0	64
300	938	72	180	527	22	199	19	0	0	135	152	1603	0	0	0	199	0	2385	169	1139	114	707	0	0	22	114	0	182
310	608	7	76	57	19	199	0	0	0	325	114	844	0	0	0	0	0	2431	0	793	91	171	0	0	0	38	0	0
320	376	37	156	425	31	109	0	0	0	109	140	1289	0	0	0	0	0	16267	0	793	91	171	0	0	0	15	0	0
330	271	27	76	57	19	199	0	0	0	325	114	844	0	0	0	0	0	16267	0	793	91	171	0	0	0	15	0	0
340	271	27	76	57	19	199	0	0	0	325	114	844	0	0	0	0	0	16267	0	793	91	171	0	0	0	15	0	0
350	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
360	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
370	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
380	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
390	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
400	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
410	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
420	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
430	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
440	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
450	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
460	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
470	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
480	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
490	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
500	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
510	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
520	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
530	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
540	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
550	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
560	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
570	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
580	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
590	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
600	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
610	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
620	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
630	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
640	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
650	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
660	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
670	397	315	198	221	112	118	47	133	0	38	469	1402	239	0	0	0	0	13271	146	4748	410	1732	73	0	0	0	0	219
680	397	315	198	221	112</																							

Annexe 11 (suite) : Tableau des concentrations polliniques absolues dans les sédiments des sondages jumeaux LLC1-2, LLC1-3/4 et LLC1-5 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH)

SPERM.	ARABIS	ERUVIA	FINES	GORVUS	GLARUS	QUERCUS	FRAXINUS	TULIA	ACER	ALNUS	FRAXUS	CORYLUS	JUGLANS	SUMPERUS	SALEX	HYPOPHAGUS	AMBRUS	HERBES	POACEAE	CYPERACEAE	FILIPENDULACEAE	APIACEAE	ANTENNARIA	CYPERACEAE	CHENOPODIACEAE	MUTICACEAE
915	0	199	683	3545	2364	1367	2763	598	83	28	0	0	0	0	0	0	0	2129	213	1084	113	243	23	0	25	
920	0	407	633	5431	2394	2486	3078	407	135	135	0	0	0	0	0	0	0	3389	407	1901	45	253	90	0	0	
925	0	201	363	3393	1937	1293	767	322	80	0	0	0	0	0	0	0	0	1938	201	787	80	243	121	0	0	
930	0	336	172	4717	2286	1010	1291	224	168	114	0	0	0	0	0	0	0	10216	336	730	56	234	0	0	0	
935	0	56	280	1089	1556	1121	870	278	113	36	0	0	0	0	0	0	0	7406	56	561	56	140	0	0	35	
940	0	203	1095	5136	2336	2013	1919	410	410	0	0	0	0	0	0	0	0	15542	203	2534	126	38	0	0	0	
945	0	268	652	4452	2608	958	1342	768	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3140	268	1726	38	0	0	0	0	
950	0	328	432	3712	2301	1931	739	328	31	82	0	0	0	0	0	0	0	2790	328	1273	41	41	0	0	0	
955	0	232	659	3200	2639	1940	1824	271	38	0	0	0	0	0	0	0	0	5344	232	2910	271	77	38	0	38	
960	0	338	939	3711	2742	1518	789	450	75	112	0	0	0	0	0	0	0	5925	338	1763	57	57	93	0	0	
965	0	233	887	7892	3315	1681	633	466	140	0	0	0	0	0	0	0	0	2749	233	887	93	93	0	0	0	
970	0	150	678	8162	1356	1135	125	276	30	25	0	0	0	0	0	0	0	1079	150	1079	125	0	0	0	0	
975	0	164	526	9130	2465	2136	65	437	58	0	0	0	0	0	0	0	0	609	164	609	32	65	0	0	0	
980	0	182	1141	1872	2664	2378	0	593	45	45	0	0	0	0	0	0	0	821	182	821	21	45	0	0	0	
985	0	46	366	6218	1500	937	0	215	64	21	0	0	0	0	0	0	0	213	46	213	21	45	0	0	0	
990	0	154	265	6173	1637	973	0	177	0	0	0	0	0	0	0	0	0	663	154	663	44	0	0	0	0	
1000	0	38	125	2658	484	369	0	25	3	8	0	0	0	0	0	0	0	236	38	236	25	0	0	0	0	
1005	0	164	305	7937	2183	962	48	197	0	0	0	0	0	0	0	0	0	317	164	317	25	0	0	0	0	
1010	0	205	432	8733	2353	1815	0	324	42	0	0	0	0	0	0	0	0	574	205	574	41	0	0	0	41	
1015	0	248	745	7313	2863	1863	0	124	0	21	0	0	0	0	0	0	0	806	248	806	41	0	0	0	0	
1020	0	449	1697	15212	3693	1443	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1591	449	1591	20	0	0	0	0	
1025	0	140	339	2031	1332	571	0	30	0	12	0	0	0	0	0	0	0	279	140	279	20	0	0	0	0	
1030	0	184	339	2031	1332	571	0	30	0	12	0	0	0	0	0	0	0	279	184	279	20	0	0	0	0	
1035	0	36	320	3954	1628	909	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	502	36	502	20	0	0	0	0	
1040	0	59	340	3954	1628	909	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74	59	74	15	0	0	0	0	
1045	0	50	411	3709	257	910	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	364	50	364	16	15	0	0	0	
1050	0	143	678	4850	1171	1099	0	97	0	10	0	0	0	0	0	0	0	208	143	208	20	20	0	0	0	
1055	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1060	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1065	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1070	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1075	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1080	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1085	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1090	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1095	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1100	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1105	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1110	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1115	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1120	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1125	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1130	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1135	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1140	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1145	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1150	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1155	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1160	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1165	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1170	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1175	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1180	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1185	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1190	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1195	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1200	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1205	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1210	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1215	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1220	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1225	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1230	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	
1235	0	63	1095	6518	1184	1043	0	55	0	37	0	0	0	0	0	0	0	158	63	158	37	10	0	0	0	

Annexe 13 (suite) : Tableau des concentrations polliniques absolues dans les sédiments du lac d'ILAY, 778 m (Jura, France)

TOTAL	ANTHRIDAE	APIACEAE	ARTEMISIA	CEREALES	CYTHRAEAE	FABACEAE	STILPIDIACEAE	PLANTAGINACEAE	PLANTAGINACEAE	POLYMONIACEAE	POLYMONIACEAE	POTAMOGETONACEAE	POTAMOGETONACEAE	RANUNCULACEAE	RUBIACEAE	RUBIACEAE	URTICACEAE
2380	0	0	10	80	70	0	70	10	250	0	0	0	0	10	0	40	0
5514	0	14	28	274	138	0	43	129	649	0	0	0	0	28	0	28	0
4993	0	18	36	36	200	0	18	182	529	0	0	0	0	18	0	18	0
4680	0	43	14	58	58	0	14	87	531	0	0	0	0	14	0	14	0
5005	0	25	25	88	250	0	20	176	529	0	0	0	0	14	0	14	0
4064	0	25	25	88	250	0	20	176	529	0	0	0	0	14	0	14	0
8073	0	0	74	169	89	0	31	23	370	0	0	0	0	25	0	31	0
9137	0	0	74	169	89	0	31	23	370	0	0	0	0	25	0	31	0
8368	0	23	23	207	56	0	48	169	314	0	0	0	0	24	0	24	0
4630	0	0	14	100	46	0	23	69	346	0	0	0	0	14	0	14	0
6723	0	0	85	85	63	0	21	72	201	0	0	0	0	21	0	21	0
37429	69	174	34	454	768	0	69	209	1237	0	0	0	0	34	0	34	0
2331	0	7	15	31	21	0	0	23	86	0	0	0	0	7	0	7	0
2319	0	5	5	22	28	0	11	40	97	0	0	0	0	22	0	22	0
14293	0	22	68	228	91	0	68	91	887	0	0	0	0	22	0	22	0
15742	0	23	70	187	70	0	23	70	888	0	0	0	0	23	0	23	0
12403	0	0	41	205	123	0	41	205	328	0	0	0	0	41	0	41	0
5491	10	0	54	151	54	0	54	151	328	0	0	0	0	54	0	54	0
3744	26	0	55	160	26	0	55	160	328	0	0	0	0	55	0	55	0
7618	0	25	51	77	102	0	102	77	313	0	0	0	0	25	0	25	0
10353	0	17	136	136	222	0	32	171	525	0	0	0	0	17	0	17	0
6769	0	24	0	73	394	0	98	123	197	0	0	0	0	24	0	24	0
731	0	0	5	29	17	0	11	17	197	0	0	0	0	5	0	5	0
9987	0	0	91	91	547	0	0	228	502	0	0	0	0	91	0	91	0
9138	0	41	0	123	205	0	123	205	246	0	0	0	0	41	0	41	0
9085	0	54	27	164	191	0	27	82	219	0	0	0	0	54	0	54	0
12776	0	30	30	184	245	0	30	307	533	0	0	0	0	30	0	30	0
17401	102	51	102	236	205	154	51	410	667	0	0	0	0	154	0	154	0
21029	0	65	65	131	98	32	32	65	230	0	0	0	0	65	0	65	0
21031	0	65	197	197	0	65	0	328	460	0	0	0	0	65	0	65	0
85	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
15045	0	0	0	207	138	0	23	93	690	0	0	0	0	0	0	0	0
13045	0	23	46	93	69	0	23	93	185	0	0	0	0	23	0	23	0
10119	82	92	0	246	82	0	82	346	1058	0	0	0	0	82	0	82	0
10403	0	37	37	113	398	37	0	75	600	0	0	0	0	37	0	37	0
18723	0	34	34	0	308	41	0	136	797	0	0	0	0	34	0	34	0
27286	0	93	0	381	381	0	0	286	572	0	0	0	0	93	0	93	0
12687	0	30	0	215	92	0	46	92	308	0	0	0	0	30	0	30	0
22832	0	0	138	323	92	0	0	231	647	0	0	0	0	0	0	0	0
15407	86	0	301	344	172	0	301	215	1119	0	0	0	0	86	0	86	0
8775	0	25	75	175	150	0	25	400	50	0	0	0	0	25	0	25	0
7101	0	25	25	232	51	0	25	181	569	0	0	0	0	25	0	25	0
4265	20	0	41	82	61	0	20	61	267	0	0	0	0	41	0	41	0
9948	0	53	0	161	167	0	0	323	646	0	0	0	0	53	0	53	0
14408	0	43	175	360	131	0	46	263	1008	0	0	0	0	43	0	43	0
13044	0	23	46	234	117	0	46	234	46	0	0	0	0	23	0	23	0
6201	0	48	48	193	48	0	48	193	488	0	0	0	0	48	0	48	0
10172	0	0	15	111	15	0	15	142	316	0	0	0	0	15	0	15	0
7077	0	58	58	99	19	0	19	78	316	0	0	0	0	58	0	58	0
5668	0	0	36	127	18	0	36	164	237	0	0	0	0	36	0	36	0
8109	0	0	36	293	36	0	36	257	367	0	0	0	0	36	0	36	0
27935	246	82	246	637	410	0	0	637	1150	0	0	0	0	82	0	82	0
4527	0	34	104	87	87	0	87	172	349	0	0	0	0	34	0	34	0
21044	78	78	313	547	469	0	44	234	1552	0	0	0	0	78	0	78	0
10342	0	89	89	268	268	0	44	224	493	0	0	0	0	89	0	89	0

Annexe 14 : Descriptions des Concentrations absolues en fonction des Zones polliniques locales du forage d'Ilay

2.2.2. Concentrations polliniques absolues et zones polliniques locales

2.2.2.1. la zone pollinique locale 1

Elle se caractérise par des concentrations polliniques absolues inférieures à $20 \cdot 10^3$ grains de pollens/gr. de sédiment. *Fagus* dépasse les autres taxons avec $40 \cdot 10^2$ grains pour des pourcentages de 10-20 %. Les *Poaceae* sont bien développés autour du site comme l'indiquaient les pourcentages relatifs. Les *Poaceae* de type *Cerealia*, les plantes rudérales et les messicoles montrent les valeurs maximales de leurs pourcentages. *Artemisia*, *Plantago lanceolata* montrent leurs valeurs les plus élevées ; elles sont respectivement comprises entre 1 et $3 \cdot 10^2$ grains/gr. et 2 et $7 \cdot 10^2$ grains/gr.. Les forts pourcentages d'*Abies* (zone 1c) ne correspondent pas à une augmentation des fréquences absolues de ce taxon.

2.2.2.2. la zone pollinique locale 2

La zone pollinique 2 coïncide avec une augmentation des pourcentages de pollens arboréens et une diminution des pourcentages de *Poaceae*. Les fréquences polliniques absolues vont dans le sens de cette diminution. En effet, 90 % de pollens arboréens correspond à $15 \cdot 20 \cdot 10^3$ grains de pollens d'arbres et d'arbustes/gr. de sédiment dont $6 \cdot 10^3$ appartiennent à *Fagus*. Les fréquences absolues de *Carpinus* contribuent à cette hausse avec 8 à $12 \cdot 10^2$ grains/gr.. Les fréquences des *Poaceae* oscillent autour de $4 \cdot 10^2$ grains/gr.. Celles de *Plantago lanceolata* croissent et atteignent $4 \cdot 10^2$ grains/gr..

2.2.2.3. la zone pollinique locale 3

Une augmentation des pourcentages d'*Alnus* caractérise la zone pollinique locale 3. Les concentrations polliniques absolues de ce taxon

sont de $20 \cdot 10^2$ grains/gr. ; des niveaux moins riches ($5 \cdot 10^2$ grains d'*Alnus* par gr.) se situent de part et d'autre de cette zone. Les concentrations polliniques absolues de *Corylus* ($10 \cdot 20 \cdot 10^3$ grains/gr.) et de *Juniperus* (maximum $3 \cdot 10^2$ grains/gr.) sont également moins élevées en début et en fin de zone 3.

2.2.2.4. la zone pollinique locale 4.

Les concentrations polliniques absolues totales varient beaucoup dans cette zone pollinique. *Juniperus* montre une nette hausse à $1 \cdot 10^2$ grains/gr. de sédiment. Les concentrations des *Poaceae* de type *cerealia* diminuent tout au long de la zone passant de $4 \cdot 10^2$ à $1 \cdot 10^2$ grains/gr..

2.2.2.5. la zone pollinique locale 5

Une brusque hausse du taux de *Juniperus* (3 %) correspond à un nombre de grains de pollen de ce taxon plus élevé ($3 \cdot 10^2$). Les pourcentages des *Poaceae* et de *Plantago lanceolata* montre un maximum qui est accompagné d'une augmentation des concentrations absolues.

La plupart des changements observés dans le diagramme pollinique relatif sont confirmés par des fluctuations des fréquences polliniques absolues de plusieurs taxons arboréens et herbacés. Les variations observées dans ces diagrammes peuvent être interprétées en termes de changements de végétation.

Les changements de concentrations polliniques absolues totales sont indépendants des changements de sédimentation. Par exemple, la craie lacustre comprise entre - 170 et - 60 cm de profondeur montre une variation importante de sa concentration pollinique. Les séquences polliniques absolues coïncident bien avec les zones polliniques locales.

Annexe 15

Annexe 15 : Tableau des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) des minéraux des sédiments "Roche Totale" du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° Echantillon	Profondeur cm	Phyllosilicates CPM	Quartz CPM	Fsp-K CPM	Plagio-Na CPM	Calcite CPM	Dolomite CPM	Aragonite CPM	Pyrite CPM
1	109	10031	40770	0	0	0	0	0	0
2	125	3240	6092	0	0	182903	2580	0	0
3	143	9703	74748	1833	0	1561	0	0	0
4	178	4717	48815	0	0	126214	4948	0	0
5	197	5568	51967	0	0	95305	3550	0	0
6	218	3650	7236	0	0	194430	2640	0	0
7	224	5580	23690	0	0	154087	2903	0	0
8	237	0	20663	0	0	201325	0	3780	0
9	262	0	21198	0	0	212390	2760	0	0
10	287	754	13184	0	0	2345	0	0	0
11	307	7943	9627	0	0	0	0	0	0
12	323	8911	13670	1409	0	0	0	0	0
13	349	10540	18385	0	0	0	0	0	0
14	366	9683	24880	1690	0	0	0	0	0
15	388	9569	23822	0	0	0	0	0	2020
16	411	2501	16948	0	0	187918	0	0	0
17	430	3073	25663	0	0	172265	2173	0	0
18	449	9655	74126	0	0	2337	2706	0	0
19	478	2274	7333	0	0	183694	0	2552	0
20	528	0	7474	0	0	207422	0	0	0
21	558	4500	5600	0	0	177085	2700	0	2460
22	580	0	3981	0	0	231198	3000	0	2100
23	600	0	8329	0	0	193895	2700	0	0
24	619	5711	20067	0	0	83182	4315	4980	0
25	650	0	8939	0	0	207822	2400	0	0
26	678	2986	10273	0	0	189519	1440	0	0
27	704	2318	21642	0	0	178913	1020	0	0
28	736	2537	18818	0	0	173416	2220	0	1140
29	751	3031	47573	0	0	142561	1860	0	1260
30	767	6629	28029	0	0	0	0	0	1941
31	778	7622	19107	0	0	0	0	0	9618
32	791	0	4067	0	0	239953	0	0	1560
33	814	0	3323	0	0	240877	0	1560	1680
34	844	3072	17181	0	0	152810	0	2040	2967
35	865	0	3086	0	0	236272	1200	2220	0
36	896	0	3662	0	0	241039	2520	1260	0
37	926	1320	4980	0	0	207982	1980	1500	0
38	957	0	3446	0	0	208762	0	1080	0
39	991	0	3604	0	0	225326	1500	0	2760
40	1025	0	2220	0	0	238945	0	0	0
41	1069	0	0	0	0	246447	0	0	0
42	1117	0	0	0	0	235105	0	0	0
43	1168	0	1800	0	0	237710	0	1200	0
44	1203	0	7946	0	0	211373	2340	1740	0
45	1238	0	30582	0	0	186039	1620	0	0
46	1262	0	3209	0	0	140441	6534	960	0
47	1284	0	11763	0	0	175148	8821	2220	0
48	1313	0	20671	0	0	149760	16462	6037	0
49	1343	0	18489	0	0	156940	10624	1740	0
50	1364	0	25781	0	0	154073	10022	3728	0
51	1379	0	33021	0	0	154960	10575	2400	0
52	1393	0	36135	0	0	146904	12726	2868	0
53	1407	0	20037	0	0	154531	10778	1620	0
54	1427	0	31820	0	0	153013	9629	2520	0
55	1449	0	26335	0	0	164693	14530	2986	0
56	1462	0	17061	0	0	157474	14744	1920	0
57	1489	0	18694	0	0	152837	15595	4218	0
58	1479	1500	31222	0	0	156415	10383	2340	0
59	1489	0	12821	1920	0	157840	17127	3317	0
60	1521	0	34371	0	0	144783	14659	3060	0
61	1556	0	19428	1260	0	157056	12548	1860	0
62	1582	0	26262	0	0	151747	12004	2340	0
63	1606	0	19871	0	0	143469	13448	2040	0
64	1623	0	24919	0	0	138265	13547	4115	0
65	1638	0	16271	0	0	136891	15471	2767	0
66	1652	0	37523	0	0	135137	14411	3234	0
67	1661	0	12549	0	0	168035	14013	2280	0
68	1669	0	23985	0	0	153019	12613	2280	0
69	1693	1860	19373	0	0	145936	14913	2700	0
70	1718	0	66033	0	0	147887	10856	2987	0
71	1743	2160	23027	0	0	143664	13185	1740	0
72	1764	1800	30796	1680	0	139030	9146	3219	0
73	1790	1500	30087	0	0	156301	9387	1560	0
74	1814	0	31210	0	0	144476	12468	3484	0
75	1832	0	20736	0	0	139834	11675	2100	0
76	1858	1080	26822	0	0	149052	11124	2160	0
77	1880	0	14533	0	0	148080	14352	4724	0
78	1911	0	28257	0	0	152046	10846	1980	0
79	1942	1500	26388	0	0	150680	11755	2909	0
80	1959	0	28591	0	0	155373	12213	1800	0
81	1977	1560	41572	0	0	152563	9339	3455	0
82	1986	0	53161	0	0	148175	8646	2760	0
83	2017	1260	25960	0	0	144356	12502	1860	0
84	2049	2820	38716	0	0	138754	13016	3346	0
85	2064	0	4186	0	0	225874	0	1200	0
86	2075	1260	9751	0	0	194896	4019	2160	0

Annexe 15 (suite) : Tableau des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) des minéraux des sédiments "Roche Totale" du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° Echantillon	Profondeur cm	Phyllosilicates CPM	Quartz CPM	Fsp-K CPM	Plagio-Na CPM	Calcite CPM	Dolomite CPM	Aragonite CPM	Pyrite CPM
80	1959	0	28591	0	0	156373	12213	1800	0
81	1977	1560	41572	0	0	152563	9339	3455	0
82	1986	0	53161	0	0	148175	8646	2760	0
83	2017	1260	25960	0	0	144356	12602	1860	0
84	2049	2820	38716	0	0	138754	13016	3346	0
85	2064	0	4186	0	0	225874	0	1200	0
86	2075	1260	9751	0	0	194896	4019	2160	0
87	2089	0	6567	0	0	196988	3143	1800	0
88	2103	1740	9032	0	0	166461	6830	1620	0
89	2111	1260	35275	0	0	145831	8923	3005	0
90	2216	0	12202	0	5667	148945	13436	3079	0
91	2236	0	23753	0	0	129595	9659	2100	0
92	2251	1260	15408	0	0	167167	13481	3112	0
93	2266	0	29712	0	0	158361	11820	2040	0
94	2272	0	16202	0	0	140466	11718	1860	0
95	2278	0	24984	0	0	150715	12321	1980	0
96	2300	0	29212	0	0	150942	10546	2940	0
97	2321	0	14159	0	0	148547	11394	4428	0
98	2336	0	20919	0	0	150329	12867	1620	0
99	2354	0	9646	0	0	174261	11014	2100	0
100	2364	2040	20709	0	0	135349	12134	2040	0
101	2677	1560	14667	0	0	157889	8815	1560	0
102	2691	2340	20252	0	0	149688	11023	1860	0
103	2705	0	25505	1440	0	139225	9164	3144	0
104	2710	0	18049	0	0	138505	15237	2838	0
105	2833	1020	46601	1140	0	163094	7095	1320	0
106	2848	1380	54610	2220	0	166957	5481	1320	0
107	2855	0	26852	0	0	173330	8336	2280	0
108	2889	2820	30667	0	0	156915	9166	0	0
109	2976	2993	31857	0	0	149413	9714	0	0
110	2988	1920	24430	0	0	171059	9802	0	0
111	3003	0	27288	0	0	148288	8334	3551	0
112	3007	0	29202	0	0	149181	10440	1800	0
113	3015	0	24625	1020	0	151992	9623	2400	0
114	3028	0	16541	0	0	154522	15862	1980	0
115	3040	0	20216	0	0	154838	15741	0	0
116	3058	1740	19390	0	0	153269	15614	1380	0
117	3075	0	35485	0	0	156833	13457	2877	0
118	3104	0	11942	2556	0	134691	16252	4123	0
119	3121	0	8792	0	0	181907	13058	2880	0
120	3134	0	25963	0	0	147674	13113	3727	0
121	3144	0	20911	0	0	157124	11742	2400	0
122	3181	0	16004	0	0	154032	12759	1680	0
123	3194	0	12027	0	0	136779	10935	3449	0
124	3208	0	12005	0	0	123131	10742	3916	0
125	3223	0	21938	0	0	159664	11748	2400	0
126	3226	0	10077	0	0	170489	16536	2762	0
127	3263	0	15830	0	0	166477	15153	1380	0
128	3277	0	16324	0	0	173490	11511	2772	0
129	3291	0	13355	0	0	144529	21116	1140	0
130	3300	1620	17974	0	0	161927	15233	1620	0
131	3314	1620	10443	0	0	165778	17857	0	0
132	3323	1200	9068	0	0	161214	17855	0	0
133	3344	0	13280	0	0	146154	21790	0	0
134	3361	0	12216	0	0	145431	16198	0	0
135	3378	0	9513	0	0	160132	15432	0	0
136	3395	0	16533	0	0	162160	11627	1680	0
137	3412	0	5662	0	0	211375	6842	1440	0
138	3429	0	30513	0	0	164285	11583	1320	0
139	3447	0	11003	0	0	163246	16849	0	0
140	3503	0	18916	0	0	160590	13065	4650	0
141	3520	0	5710	0	0	160754	14509	2280	0
142	3538	0	27640	0	0	154053	11585	2836	0
143	3558	0	26999	0	0	161929	11151	1920	0
144	3578	0	24414	0	0	158566	10344	1740	0
145	3592	0	24057	0	0	149173	10933	3118	0
146	3611	0	30693	0	0	151080	9898	1560	0
147	3810	0	39365	0	0	153915	8876	1440	0
148	3830	0	52629	0	0	149221	10218	2220	0
149	3849	0	52979	0	0	157243	10680	3240	0
150	3859	0	23654	0	1980	139766	13768	4145	0
151	3875	0	57958	1380	0	161401	7511	2160	0
152	3888	0	32411	0	3240	159334	14826	2940	0
153	3901	0	49889	1800	0	165865	12155	3027	0
154	4037	0	31075	0	0	168869	12101	2815	0
155	4053	0	41954	0	0	170332	12700	2915	0
156	4066	0	38921	0	0	127027	11031	2675	0

Annexe 16

Annexe 16 : Tableau des pourcentages des minéraux dans les sédiments "Roche Totale" du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° Echantillon	Profondeur en cm	Phyllosilicates	Quartz	Fsp-K	Plagioclases	Calcaire	Dolomite	Aragonite	Pyrite	Indosés
1	109	49.17	6.45	0	0	0	0	0	0	44.38
2	125	22.66	1.38	0	0	69.83	1.09	0	0	5.03
3	143	47.12	11.71	0	0	0.41	0	0	0	40.76
4	178	28.94	9.66	0	0	42.26	1.84	0	0	17.3
5	197	32.13	9.68	0	0	30.01	1.24	0	0	26.94
6	218	26.31	1.7	0	0	76.24	1.17	5.86	0	-5.37
7	224	36.5	5	0	0	55.01	1.15	0	0	2.34
8	237	0	4.79	0	0	78.86	0	5.67	0	10.68
9	262	0	4.96	0	0	84.02	1.21	0	0	9.81
10	287	36.75	2.07	0	0	0.62	0	0	0	60.55
11	307	38.62	1.51	0	0	0	0	0	0	59.87
12	323	43.26	2.14	0	0	0	0	0	0	54.6
13	349	52.2	2.94	0	0	0	0	0	0	44.86
14	366	47.85	3.97	0	0	0	0	0	0	48.18
15	388	48.33	3.88	0	0	0	0	0	0.69	47.1
16	411	17.7	3.87	0	0	72.59	0	0	0	5.84
17	430	20.96	5.65	0	0	64.12	0.9	0	0	8.37
18	449	47.08	11.66	0	0	0.62	0.8	0	0	39.84
19	478	16.16	1.68	0	0	71.24	0	3.79	0	7.13
20	528	0	1.8	0	0	84.39	0	0	0	13.82
21	558	31.9	1.28	0	0	68.51	1.16	0	1.19	-4.03
22	580	0	1.03	0	0	101.22	1.46	0	1.15	-4.86
23	600	0	1.94	0	0	76.42	1.18	0	0	20.46
24	619	33.62	3.81	0	0	26.73	1.54	6.13	0	28.17
25	650	0	2.15	0	0	84.62	1.09	0	0	12.15
26	678	21.33	2.37	0	0	73.9	0.62	0	0	1.77
27	704	16.12	4.86	0	0	67.91	0.43	0	0	10.68
28	736	17.6	4.21	0	0	65.65	0.93	0	0.54	11.07
29	751	19.56	9.91	0	0	50.21	0.73	0	0.55	19.05
30	767	33.5	4.57	0	0	0	0	0	0.67	61.27
31	778	42.1	3.41	0	0	0	0	0	3.61	50.88
32	791	0	1.03	0	0	96.82	0	0	0.84	1.31
33	814	0	0.85	0	0	98.09	0	2.59	0.91	-2.44
34	844	20.5	3.7	0	0	52.25	0	2.84	1.35	19.36
35	865	0	0.78	0	0	94.39	0.57	3.62	0	0.65
36	896	0	0.93	0	0	96.98	1.2	2.07	0	-1.18
37	926	9.63	1.17	0	0	77.75	0.88	2.29	0	8.28
38	957	0	0.81	0	0	78.06	0	1.65	0	19.49
39	991	0	0.89	0	0	88.72	0.7	0	1.44	8.24
40	1025	0	0.56	0	0	95.21	0	0	0	4.23
41	1069	0	0	0	0	100	0	0	0	0
42	1117	0	0	0	0	92.9	0	0	0	7.1
43	1168	0	0.45	0	0	94.91	0	1.95	0	2.68
44	1203	0	1.94	0	0	87.44	1.08	2.76	0	6.79
45	1238	0	6.96	0	0	71.61	0.69	0	0	20.74
46	1262	0	0.67	0	0	49.59	2.56	1.3	0	45.88
47	1284	0	2.65	0	0	66.8	3.74	3.24	0	23.57
48	1313	0	4.49	0	0	55.02	6.72	8.49	0	25.28
49	1343	0	3.99	0	0	57.34	4.31	2.43	0	31.92
50	1364	0	5.58	0	0	56.36	4.07	5.22	0	28.76
51	1379	0	7.1	0	0	56.33	4.27	3.34	0	28.96
52	1393	0	7.65	0	0	52.6	5.06	3.93	0	30.76
53	1407	0	4.3	0	0	56.12	4.35	2.25	0	32.98
54	1427	0	6.82	0	0	55.44	3.88	3.5	0	30.37
55	1449	0	5.83	0	0	61.22	6	4.25	0	22.7
56	1462	0	3.68	0	0	57.51	5.98	2.68	0	30.14
57	1469	0	4.04	0	0	55.86	6.33	5.9	0	27.87
58	1479	9.99	6.71	0	0	55.87	4.19	3.26	0	18.98
59	1489	0	2.79	1.38	0	58.18	7.01	4.68	0	25.95
60	1521	0	7.23	0	0	51.54	5.8	4.17	0	31.26
61	1556	0	4.14	0.89	0	54.39	5.02	2.56	0	33.01
62	1582	0	5.6	0	0	54.72	4.81	3.23	0	31.65
63	1606	0	4.17	0	0	50.88	5.3	2.77	0	36.89
64	1623	0	5.22	0	0	48.94	5.33	5.58	0	34.94
65	1638	0	3.38	0	0	48.13	6.04	3.72	0	38.73
66	1652	0	7.74	0	0	47.17	5.59	4.32	0	35.18
67	1661	0	2.81	0	0	63.71	5.9	3.31	0	24.26
68	1669	0	5.19	0	0	56	5.13	3.19	0	30.49
69	1693	12.33	4.14	0	0	52.81	5.99	3.74	0	20.98
70	1718	0	14.02	0	0	53.11	4.33	4.11	0	24.43
71	1743	14.17	4.88	0	0	51.44	5.24	2.39	0	21.89
72	1764	11.75	6.49	0.75	0	49.55	3.62	4.39	0	23.44
73	1790	10.07	6.52	0	0	57.3	3.82	2.19	0	20.1
74	1814	0	6.66	0	0	52.14	5	4.81	0	31.39
75	1832	0	4.37	0	0	49.78	4.62	2.86	0	38.37
76	1858	7.17	5.75	0	0	54.01	4.48	3	0	25.59
77	1880	0	3.16	0	0	54.42	5.86	6.65	0	29.92
78	1911	0	6.09	0	0	55.38	4.39	2.76	0	31.39
79	1942	9.81	5.61	0	0	53.76	4.66	3.97	0	22.19

Annexe 16 (suite) : Tableau des pourcentages des minéraux dans les sédiments "Roche Totale" des forages LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° Echantillon	Profondeur en cm	Phyllosilicates	Quartz	Fsp-K	Plagioclases	Calcite	Dolomite	Aragonite	Pyrite	Indosés
80	1959	0	6.07	0	0	56.13	4.87	2.47	0	30.46
81	1977	10.22	8.79	0	0	54.55	3.71	4.73	0	17.99
82	1986	0	11.07	0	0	52.17	3.38	3.72	0	29.66
83	2017	8.09	5.38	0	0	50.6	4.91	2.5	0	28.52
84	2049	17.97	7.96	0	0	48.27	5.03	4.46	0	16.3
85	2064	0	1.04	0	0	95.06	0	1.93	0	1.97
86	2075	9.06	2.26	0	0	76.5	1.75	3.25	0	7.18
87	2089	0	1.53	0	0	77.62	1.38	2.72	0	16.76
88	2103	11.73	1.97	0	0	61.27	2.79	2.28	0	19.95
89	2111	8.1	7.32	0	3	51.16	3.48	4.04	0	22.91
90	2216	0	2.58	0	0	53.21	5.33	4.21	0	34.67
91	2236	0	4.79	0	0	44.17	3.66	2.74	0	44.65
92	2251	8.68	3.43	0	0	62.88	5.63	4.48	0	14.89
93	2266	0	6.43	0	0	57.94	4.8	2.86	0	27.97
94	2272	0	3.39	0	0	49.66	4.6	2.52	0	39.84
95	2278	0	5.32	0	0	54.32	4.93	2.73	0	32.69
96	2300	0	6.25	0	0	54.61	4.24	4.07	0	30.83
97	2521	0	3.05	0	0	54.08	4.61	6.17	0	32.09
98	2536	0	4.45	0	0	54.11	5.14	2.23	0	34.06
99	2554	0	2.17	0	0	66.35	4.66	3.06	0	23.76
100	2564	13.07	4.28	0	0	47.34	4.71	2.73	0	27.87
101	2677	10.41	7.46	0	0	57.49	3.57	2.17	0	18.9
102	2691	15.43	4.31	0	0	53.87	4.41	2.56	0	19.43
103	2705	0	5.28	0.98	0	48.72	3.56	4.21	0	37.24
104	2710	0	3.73	0	0	48.44	5.92	3.8	0	38.11
105	2833	6.77	9.99	0.81	0	59.1	2.86	1.83	0	18.65
106	2848	9.22	11.78	1.58	0	60.89	2.22	1.84	0	12.47
107	2855	0	5.94	0	0	64.81	3.46	3.26	0	22.53
108	2889	18.44	6.47	0	0	56.01	3.63	0	0	15.44
109	2976	19.26	6.62	0	0	52.48	3.79	0	0	17.85
110	2988	12.97	5.32	0	0	63.05	4.01	0	0	14.65
111	3003	0	5.76	0	0	52.91	3.3	4.85	0	33.18
112	3007	0	6.12	0	0	52.86	4.11	2.44	0	34.47
113	3015	0	5.21	0.71	0	54.41	3.83	3.29	0	32.55
114	3028	0	3.52	0	0	55.63	6.34	2.73	0	31.78
115	3040	0	4.26	0	0	55.22	6.24	0	0	34.29
116	3058	11.7	4.21	0	0	56.25	6.36	1.94	0	19.54
117	3075	0	7.78	0	0	58.14	5.54	4.08	0	24.46
118	3104	0	2.53	0	0	48.3	6.47	5.66	0	37.03
119	3121	0	2.05	0	0	71.75	5.72	4.35	0	16.13
120	3134	0	5.62	0	0	54.05	5.33	5.22	0	29.77
121	3144	0	4.6	0	0	58.47	4.85	3.42	0	28.67
122	3181	0	3.49	0	0	56.73	5.22	2.37	0	32.19
123	3194	0	2.53	0	0	49.06	4.36	4.74	0	39.29
124	3208	0	2.48	0	0	43.08	4.17	5.25	0	45.02
125	3223	0	4.84	0	0	59.62	4.87	3.43	0	27.23
126	3226	0	2.29	0	0	65.52	7.06	4.06	0	21.06
127	3263	0	3.54	0	0	62.92	6.36	2	0	25.19
128	3277	0	3.88	0	0	68.83	5.07	4.21	0	18.01
129	3291	0	2.92	0	0	53.47	8.68	1.61	0	33.31
130	3300	11.41	4.09	0	0	62.26	6.51	2.38	0	13.35
131	3314	11.45	2.38	0	0	63.96	7.65	0	0	14.56
132	3323	8.4	2.05	0	0	61.58	7.58	0	0	20.39
133	3344	0	2.78	0	0	51.75	8.57	0	0	36.9
134	3361	0	2.55	0	0	51.4	6.36	0	0	39.68
135	3378	0	2.05	0	0	58.41	6.25	0	0	33.28
136	3395	0	3.6	0	0	59.74	4.76	2.37	0	29.54
137	3412	0	1.38	0	0	87.1	3.13	2.27	0	6.12
138	3429	0	6.64	0	0	60.47	4.74	1.86	0	26.29
139	3447	0	2.39	0	0	59.93	6.87	0	0	30.81
140	3503	0	4.24	0	0	60.87	5.5	6.76	0	22.62
141	3520	0	1.27	0	0	60.52	6.07	3.29	0	28.86
142	3538	0	6.04	0	0	56.97	4.76	4.02	0	28.22
143	3558	0	5.98	0	0	60.65	4.64	2.75	0	25.98
144	3578	0	5.36	0	0	58.84	4.27	2.48	0	29.05
145	3592	0	5.22	0	0	54.72	4.45	4.38	0	31.23
146	3611	0	6.62	0	0	55.12	4.01	2.18	0	32.06
147	3810	0	8.52	0	0	56.33	3.61	2.02	0	29.53
148	3830	0	11.28	0	0	54.08	4.11	3.08	0	27.45
149	3849	0	11.61	0	0	58.26	4.4	4.6	0	21.14
150	3859	0	5.06	1.4	0	50.58	5.53	5.74	0	31.68
151	3875	0	12.73	1	0	59.96	3.1	3.07	0	20.14
152	3888	0	7.04	0	1.8	58.56	6.05	4.14	0	22.41

Annexe 17

Annexe 17 : Description des zones minéralogiques du sédiment total du forage LLC1 du Marais du Col-des-Roches (NEuchatel ; Suisse)

1.1.1.1. La zone RT 1 à calcite, dolomite et aragonite (- 41, à - 13 m) : les argiles silteuses grises

La composition moyenne de la zone RT1 indique que la calcite est la plus abondante (55 à 60 % pour des intensités relativement élevées de 150.10^3 coups par minute), suivie par le quartz (4 à 5 %) et la dolomite (4 % soit environ 2.10^3 à 4.10^3 CPM). L'aragonite et les phyllosilicates constituent respectivement 2.5 et 7 % du sédiment total. Les indosés (environ 20 %) sont attribués aux minéraux argileux, et aux amorphes comme la matière organique. A l'intérieur de cette zone RT1, 5 sous-zones peuvent être différenciées.

- sous-zone RT1a : (de - 41 à - 36.32 m) : elle est soulignée par la présence de feldspaths potassiques (1.5 % à - 39 m) et de plagioclases (2 % à - 39 m) ; les taux d'aragonite, de dolomite et de quartz évoluent dans le même sens.

- sous-zone RT 1b : (de - 36.32 à - 29.5 m) : cette sous-zone est caractérisée par deux maxima du taux d'aragonite ; la quantité de dolomite montre une augmentation progressive jusqu'à 10 % puis diminue ; les pourcentages de quartz évoluent en opposition de phase avec la dolomite.

- sous-zone RT 1c : (de - 29.5 à - 21 m) : une augmentation progressive du taux de dolomite associée à une hausse rapide du taux de quartz en début de sous-zone caractérisent cette dernière.

- sous-zone RT 1d : (gyttjas de - 21 à - 20 m) : elle est caractérisée par la brusque hausse des valeurs de la calcite à 75 % et une baisse des valeurs du quartz et de la dolomite. Cet événement romps l'uniformité des tracés vers - 21 m de profondeur.

- sous-zone RT 1e : (de - 20 à - 13 m) : l'allure monotone des courbes caractérise la zone RT1e. La présence des phyllosilicates est décelée dans la première moitié de RT1e ; des occurrences de feldspaths potassiques peuvent être relevées entre - 16 et - 13 m de profondeur.

1.1.1.2. zone RT2 à calcite (- 13, - 10 m), premier niveau de craie lacustre

La hausse progressive du taux de la calcite de 50 à 95 % marque le début de la zone RT2. Quartz, dolomite, phyllosilicates, feldspaths potassiques et calco-sodiques sont pratiquement absents. La pyrite est identifiée à - 10 m. Un pic d'aragonite à 2.5 % marque le début de cette zone.

1.1.1.3. zone RT3 à calcite et aragonite (- 10, - 8 m), niveau de craie organique

L'aragonite (5 %) et la dolomite (2.5 %) réapparaissent dans le sédiment total. Les taux de phyllosilicates augmentent brusquement au sommet de la zone. La pyrite, dont la présence est irrégulière, atteint 4 % ; le taux de quartz varie de 2 % à 3 % ; la quantité de calcite diminue ponctuellement.

1.1.1.4. zone RT4 à calcite, quartz et phyllosilicates(- 8, - 4 m), niveau de gyttja

Cette zone se différencie des autres par la présence de forts pourcentages de phyllosilicates (20-40 %) et par la présence de calcite en quantités variables. Deux pics de quartz à 12 % limitent la zone. La quantité de dolomite est plus élevée que dans la zone 3.

1.1.1.5. zone RT5 à phyllosilicates et quartz (- 4, - 3 m), niveaux de tourbe, précédée de trois horizons tourbeux

La zone RT5 est caractérisée par l'absence des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) et par les forts pourcentages de phyllosilicates (50 %). Le quartz est présent en quantités variables. Le taux d'indosés atteint 60 %.

1.1.1.6. zone RT6 à calcite, quartz et phyllosilicates (- 3, - 1 m)

La zone minéralogique RT6 s'apparente à la zone RT4 par les variations du pourcentage de calcite, les occurrences d'aragonite et la présence de dolomite proche de 2.5 %. Les phyllosilicates, avec des valeurs de l'ordre de 30 à 50 %, sont plus abondants que le quartz présent avec près de 10 % du sédiment total.

Annexe 18 : Tableau des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) des minéraux des sédiments "Roche Totale" des forages LLC1-2, LLC1-3/4 et LLC1-5 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° Echantillon	Profondeur en cm	Phyllosilicates	Quartz	Feldspath .K	Plagioclases	Calcite	Dolomite	Aragonite	Pyrite
1	137	2904	6348	0	0	163076	0	0	0
2	180	4937	45023	0	0	94098	3660	0	0
3	230	1560	2678	0	0	185583	720	1320	0
4	237	3279	15005	0	0	138254	2263	0	0
5	250	1560	3694	0	0	181075	0	1020	0
6	385	8735	13213	0	0	1429	0	0	0
7	405	3814	35890	0	0	126003	2819	0	0
8	425	3165	27995	0	0	146746	1920	0	0
9	460	8487	64294	0	0	23598	2950	0	0
10	500	3139	48368	0	0	138445	1740	0	0
11	530	0	6981	0	0	168908	0	1320	1500
12	560	3060	8216	0	0	135189	2461	0	1080
13	590	1260	3619	0	0	188948	1260	960	0
14	630	1200	2939	0	0	184969	1200	1200	0
15	670	1620	7549	0	0	168259	0	0	1940
16	700	2197	8530	0	0	175402	1500	0	1260
17	730	2340	51388	0	0	153238	2020	0	0
18	760	2193	40111	0	0	133286	1860	0	1260
19	815	2177	9591	0	0	145214	0	1500	0
20	830	1560	6843	0	0	177798	0	1380	1800
21	840	1440	5722	0	0	158756	0	1680	0
22	850	4391	13045	0	0	89544	0	1852	2455
23	860	0	2220	0	0	194160	0	2340	1500
24	845	0	1920	0	0	126586	0	1260	0
25	855	0	3386	0	0	192991	0	2340	0
26	865	0	2760	0	0	191387	0	2940	0
27	875	0	3116	0	0	186546	0	2880	0
28	885	0	2460	0	0	187614	0	1380	1080
29	895	0	2631	0	0	183377	0	1620	1440
30	905	0	3315	0	0	182180	0	1560	1680
31	915	0	3470	0	0	180289	0	1560	1860
32	925	0	3734	0	0	169557	0	1800	1620
33	935	0	4047	0	0	165525	0	1200	1260
34	945	1680	5173	0	0	187770	0	1920	900
35	955	960	4172	0	0	152125	0	1020	1440
36	965	1740	4392	0	0	172649	0	1560	1200
37	975	1680	5878	0	0	170426	0	1920	1740
38	985	0	3022	0	0	205959	0	1380	1140
39	995	0	3441	0	0	189691	0	1800	1200
40	1005	0	2220	0	0	188713	0	780	0
41	1015	0	1320	0	0	210921	0	0	0
42	1025	0	1560	0	0	212407	0	720	0
43	1030	0	6598	0	0	190938	0	1740	0
44	1035	0	1740	0	0	211023	0	1080	0
45	1045	0	1020	0	0	220794	0	0	0
46	1055	0	1080	0	0	218336	0	0	0
47	1065	0	1560	0	0	205237	0	0	0
48	1075	0	0	0	0	210470	0	0	0
49	1085	0	1020	0	0	216839	0	0	0
50	1095	0	0	0	0	218366	0	0	0
51	1105	0	0	0	0	212468	0	0	0
52	1115	0	1800	0	0	209956	0	0	0
53	1125	0	1500	0	0	203581	0	0	0
54	1130	0	2809	0	0	200991	0	1020	0
55	1132	0	3883	0	0	209632	0	1960	0
56	1137	0	4005	0	0	195429	0	1940	0
57	1145	0	3079	0	0	185160	0	1080	0
58	1155	0	1260	0	0	206123	0	0	0
59	1165	0	1200	0	0	214442	0	0	0
60	1175	0	1260	0	0	212760	0	780	0
61	1185	0	1440	0	0	216001	0	960	0
62	1195	0	3591	0	0	204308	0	960	0
63	1215	0	3120	0	600	179700	0	600	0
64	1220	0	3060	0	900	186053	0	1140	0
65	1225	0	3319	0	900	184111	0	1260	0
66	1230	0	3713	0	780	174590	0	2340	0
67	1235	0	5493	0	0	123942	0	1740	0
68	1240	600	12487	0	0	157880	2400	4948	0
69	1245	1080	12609	0	0	144781	4329	4548	0
70	1255	0	10520	0	0	160708	5083	2280	0
71	1260	840	5679	0	0	169797	7644	2400	0
72	1265	960	3824	0	0	163189	7646	1380	0
73	1270	0	3872	0	0	169859	5259	1320	0
74	1275	1020	3663	0	0	157975	5465	720	0
75	1280	840	3808	0	0	153047	5930	1320	0
76	1285	1080	4453	0	0	154176	5869	1560	0
77	1290	1200	6064	0	0	133271	8618	1200	0
78	1295	1140	6739	0	0	141379	7258	1440	0

Annexe 19

Annexe 19 : Tableau des pourcentages approximatifs des minéraux dans les sédiments "Roche Totale" du sondage LLC1-2, LLC1-3/4 et LLC1-5 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° Echantillon	Profondeur en cm	Calcite	Dolomite	Aragonite	Dolomite	Quartz	Pyrite	Plagioclases	Phyllosilicates	Indosés
1	137	61.402	0	0	0	1.413	0	0	20.033	17.152
2	180	30.397	1.313	0	1.313	8.6	0	0	29.22	30.471
3	230	74.025	0.319	2.016	0.319	0.632	0	0	11.401	11.608
4	237	49.243	0.895	0	0.895	3.16	0	0	21.398	25.304
5	250	71.366	0	1.539	0	0.861	0	0	11.265	14.97
6	385	0.396	0	0	0	2.163	0	0	44.304	53.138
7	405	43.494	1.081	0	1.081	7.325	0	0	24.121	23.979
8	425	53.02	0.771	0	0.771	5.981	0	0	20.951	19.277
9	460	6.66	0.925	0	0.925	10.729	0	0	43.885	37.801
10	500	48.865	0.682	0	0.682	10.094	0	0	20.299	20.059
11	536	65.56	0	1.962	0	1.602	0.726	0	0	30.15
12	560	48.373	0.978	0	0.978	1.738	0.482	0	20.061	28.368
13	590	75.822	0.562	1.475	0.562	0.859	0	0	9.264	12.018
14	630	73.635	0.531	1.829	0.531	0.692	0	0	8.752	14.561
15	670	65.047	0	0	0	1.726	0.935	0	11.474	20.819
16	700	68.518	0.651	0	0.651	1.97	0.614	0	15.724	12.523
17	730	55.79	0.817	0	0.817	11.062	0	0	15.609	16.723
18	760	47.147	0.731	0	0.731	8.389	0.556	0	14.213	28.965
19	815	32.935	0	2.094	0	2.067	0	0	14.54	28.365
20	830	70.569	0	2.097	0	1.606	0.891	0	11.344	13.493
21	840	59.685	0	2.418	0	1.272	0	0	9.919	26.706
22	850	29.825	0	2.367	0	2.375	1.022	0	26.856	37.356
23	860	80.232	0	3.702	0	0.542	0.773	0	0	14.751
24	845	44.446	0	1.694	0	0.399	0	0	0	53.461
25	855	78.644	0	3.651	0	0.816	0	0	0	16.889
26	865	77.916	0	4.583	0	0.664	0	0	0	16.837
27	875	75.075	0	4.438	0	0.741	0	0	0	19.745
28	885	75.809	0	2.135	0	0.588	0.544	0	0	20.924
29	895	73.657	0	2.491	0	0.625	0.721	0	0	22.505
30	905	73.08	0	2.396	0	0.786	0.84	0	0	22.898
31	915	72.11	0	2.389	0	0.821	0.927	0	0	23.752
32	925	66.167	0	2.689	0	0.862	0.788	0	0	29.494
33	935	63.668	0	1.767	0	0.92	0.604	0	0	33.04
34	945	75.924	0	2.973	0	1.237	0.454	0	12.446	6.967
35	955	56.886	0	1.46	0	0.922	0.671	0	6.577	33.483
36	965	67.329	0	2.336	0	1.016	0.585	0	12.469	16.065
37	975	66.694	0	2.877	0	1.36	0.849	0	12.046	16.174
38	985	86.91	0	2.23	0	0.754	0.6	0	0	9.507
39	995	77.206	0	2.805	0	0.828	0.609	0	0	18.532
40	1005	75.646	0	1.197	0	0.526	0	0	0	22.63
41	1015	88.891	0	0	0	0.329	0	0	0	10.78
42	1025	90.105	0	1.169	0	0.391	0	0	0	8.335
43	1030	77.172	0	2.693	0	1.577	0	0	0	18.559
44	1035	89.342	0	1.751	0	0.436	0	0	0	8.472
45	1045	95.376	0	0	0	0.261	0	0	0	4.364
46	1055	93.732	0	0	0	0.274	0	0	0	5.994
47	1065	85.297	0	0	0	0.383	0	0	0	14.32
48	1075	88.631	0	0	0	0	0	0	0	11.369
49	1085	92.742	0	0	0	0.258	0	0	0	7
50	1095	93.776	0	0	0	0	0	0	0	6.224
51	1105	89.914	0	0	0	0	0	0	0	10.086
52	1115	88.264	0	0	0	0.447	0	0	0	11.289
53	1125	84.271	0	0	0	0.567	0	0	0	15.362
54	1130	83.009	0	1.613	0	0.686	0	0	0	14.692
55	1132	88.729	0	3.176	0	0.972	0	0	0	7.123
56	1137	79.943	0	3.039	0	0.969	0	0	0	16.05
57	1145	73.694	0	1.646	0	0.725	0	0	0	23.936
58	1155	85.856	0	0	0	0.31	0	0	0	13.834
59	1165	91.167	0	0	0	0.302	0	0	0	8.531
60	1175	90.362	0	1.268	0	0.316	0	0	0	8.053
61	1185	92.841	0	1.575	0	0.365	0	0	0	5.52
62	1195	77.798	0	1.216	0	0.804	0	0.178	0	20.004
63	1200	74.31	0	1.743	0	0.723	0	0.543	0	22.681
64	1205	73.239	0	1.919	0	0.781	0	0.541	0	23.52
65	1210	68.294	0	3.505	0	0.859	0	0.461	0	26.882
66	1220	43.417	0	2.334	0	1.138	0	0	0	53.111
67	1225	50.406	0.975	6.926	0.975	2.699	0	0	4.019	34.976
68	1230	53.589	1.78	6.445	1.78	2.76	0	0	7.324	28.103
69	1235	60.905	2.141	3.308	2.141	2.357	0	0	0	31.288
70	1240	65.784	3.29	3.56	3.29	1.301	0	0	5.963	20.103
71	1245	62.049	3.229	2.009	3.229	0.86	0	0	6.688	25.166
72	1255	65.51	2.253	1.949	2.253	0.883	0	0	0	29.405
73	1260	39.195	2.275	1.033	2.275	0.812	0	0	7.003	29.683
74	1265	56.901	2.449	1.879	2.449	0.837	0	0	5.722	32.212
75	1270	57.515	2.432	2.228	2.432	0.982	0	0	7.382	29.461
76	1275	47.486	3.411	1.637	3.411	1.278	0	0	7.834	38.354
77	1280	51.274	2.924	2	2.924	1.445	0	0	7.575	34.783

Annexe 20 : Description des zones minéralogiques du sédiment total des forages LLC1-2 à 5 du Marais du Col-des-Roches (NEuchatel ; Suisse)

1.1.4.1. zone RT1 à calcite, dolomite et aragonite (- 12. 80, - 12. 20 m), les argiles silteuses grises

La quantité de calcite est importante, elle constitue 50 à 65 % du sédiment total. Le pourcentage de dolomite régresse régulièrement au cours de cette zone (3.5 à 0 %). L'aragonite, au contraire, laisse apparaître une très nette augmentation de 2 à 7 %, valeur maximale atteinte dans ce forage. Le taux de quartz diminue dans la première moitié de la zone 1 pour augmenter dans la seconde moitié. Les pourcentages des phyllosilicates varient entre 0 et 10 %, puis régressent. Une absence de la dolomite est observée au sommet de la zone.:

- sous-zone RT1a à dolomite et phyllosilicates (- 12. 80, - 12. 45 m)

Le pourcentage de la calcite passe de 45 % à 60 % ; la quantité de dolomite et de quartz régressent légèrement de 1 %.

- sous-zone RT1b à calcite, dolomite et phyllosilicates (- 12. 45, - 12. 20 m)

Cette sous-zone est caractérisée par la diminution du taux de calcite de 65 à 45 %. La quantité de dolomite disparaît progressivement en passant de 3 à 0 % du sédiment total. A l'opposé, on observe une augmentation des taux d'aragonite (2 à 8 %) et de quartz (0.5 à 3 %).

1.1.4.2. zone RT2 à calcite et plagioclases (- 12. 20, - 11. 95 m), le début des craies lacustres

Cette zone minéralogique est caractérisée par 0.6 % de plagioclases dans le sédiment total. Les plagioclases ne seront plus rencontrés dans le sédiment de ce forage (figures 2.32 et 2.33).

Les valeurs de la calcite sont croissantes de 40 à 80 %. Le taux de l'aragonite et de quartz diminue. La limite inférieure de la zone correspond à la hausse du taux de calcite et à la régression de celui de l'aragonite.

1.1.4.3. zone RT3 à calcite (- 11. 95, - 10 m)

La calcite et l'aragonite sont les deux seuls minéraux présents. Les pourcentages d'aragonite présentent deux pics (2-4 %) coïncidant à deux

reculs du taux de calcite (75 à 85 %). La limite inférieure de la zone correspond à l'absence des plagioclases. La hausse du taux d'aragonite matérialise la limite supérieure de la zone.

1.1.4.4. zone RT4 à calcite, aragonite et pyrite (- 10, - 8 m)

La présence continue de 0.5 à 1 % de pyrite et de 2 % d'aragonite caractérise la zone. Le dernier tiers se traduit par un pic d'aragonite à 6 %. La quantité de quartz passe de 5 à 10 %. La limite inférieure est caractérisée par l'apparition de la pyrite alors que le recul des taux d'aragonite et de calcite fixe la limite supérieure.

1.1.4.5. zone RT5 à calcite, quartz et phyllosilicates (- 8, - 7 m)

La zone 5 se traduit par la réapparition de dolomite dans le sédiment (1 %) et par une augmentation du taux de quartz. La présence de pyrite n'est pas constante. La limite inférieure est fixée par la régression du taux d'aragonite et la réapparition de la dolomite. La limite supérieure se marque par la chute du pourcentage de quartz.

1.1.4.6. zone RT6 à calcite, aragonite et dolomite (- 7, - 5. 50 m)

Elle se caractérise par la diminution significative du pourcentage de quartz et l'augmentation de la calcite. La dolomite, après une brève disparition, réapparaît à nouveau (environ 1 %). La présence de la pyrite et de l'aragonite est ponctuelle. La limite inférieure de la zone est marquée par la régression des pourcentages de quartz ; la limite supérieure coïncide avec le recul des taux de dolomite et de phyllosilicates.

1.1.4.7. zone RT7 à phyllosilicates et quartz (- 5. 50, - 1. 00 m)

Les pourcentages de la calcite chutent brusquement à - 4.5 m et - 3.9 m. Le pourcentage de quartz augmente fortement dans la première moitié de cette zone et décroît légèrement ensuite. Les pourcentages des phyllosilicates augmentent. La limite inférieure est fixée par la hausse brutale du quartz. La limite supérieure est définie par la décroissance du taux de quartz et l'absence de la calcite à 3.90 m.

NB : Les tourbes comprises entre -3. 90/-2. 50 m de ce forage n'ont pas été analysées par les rayons X.

Annexe 21

Annexe 21 : Tableau des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) des minéraux des sédiments "Roche Totale" du sondage LLC2 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° Echantillon	Profondeur en cm	Phyllosilicates	Quartz	Feldspaths -K	Plagioclases	Calcite	Dolomite	Aragonite
1	57	4044	359838	0	0	147138	0	0
2	67	8091	23752	0	0	2914	0	0
3	78	7872	17131	0	0	2266	0	0
4	89	8525	12548	0	0	0	0	0
5	100	6176	14645	0	0	5410	0	1265
6	111	7849	24458	0	0	2573	1606	0
7	123	8495	16894	0	0	0	0	0
8	134	7685	21602	0	0	1587	0	0
9	145	4591	9313	0	0	2219	1330	0
10	161	9141	18711	0	0	2935	0	1565
11	173	10584	21420	0	0	2273	1422	0
12	184	5345	19380	0	0	1750	0	0
13	196	5536	19869	0	0	0	1310	0
14	208	7848	11090	0	0	0	0	0
15	213	10218	16449	0	0	0	0	0
16	225	8080	14182	0	0	0	0	0
17	237	6785	10988	0	0	1281	1239	0
18	248	6623	13634	0	0	0	0	0
19	259	11578	21963	0	0	0	0	0
20	268	6513	14476	0	0	0	0	0
21	286	4928	11311	0	0	1248	0	0
22	303	7852	12247	0	0	0	0	0
23	302	5110	9843	0	0	1135	1177	1271
24	337	6352	10128	0	0	1117	0	1151
25	355	8435	13876	0	0	1539	0	0
26	372	4306	7914	0	0	0	0	1848
27	388	2081	3437	0	0	1553	1320	0
28	399	1854	3161	0	0	1946	0	0
29	409	2386	2509	0	0	1716	1113	0
30	419	6464	29196	0	0	1563	1305	0
31	432	9307	41475	0	0	1433	1506	0
32	443	8208	20836	0	0	0	0	0
33	457	5249	9417	0	0	0	1824	0
34	466	9337	55410	0	0	0	0	0
35	476	8771	19681	0	0	0	0	0
36	488	8781	24646	0	0	0	0	0
37	501	6445	11336	0	0	1652	0	0
38	513	8370	7982	0	0	0	1372	0
39	525	0	0	0	0	0	0	0
40	537	3788	10152	0	0	1202	0	0
41	549	3677	9008	0	0	1488	0	1708
42	562	6108	16593	0	0	0	1941	0
43	574	6547	23205	0	0	0	0	0
44	590	5990	26568	0	0	0	0	1501
45	605	7221	38987	0	0	1406	0	0
46	621	10561	60273	0	0	0	0	0
47	636	2590	18581	0	0	182808	3240	0
48	651	3362	33405	0	0	171184	3420	2522
49	666	0	45807	0	0	191554	3899	0
50	694	2100	37819	0	0	176377	6162	1860
51	709	2163	37174	0	0	181212	5758	1800
52	723	2344	29399	0	0	169365	5717	1320
53	738	2238	24462	0	0	183664	4815	1500
54	752	0	20763	0	0	193103	4724	1500
55	766	0	19627	0	0	209887	4621	1500
56	781	0	13953	0	0	209739	2373	1260
57	792	0	17718	0	0	205835	2822	1080
58	805	0	24375	0	0	211211	3490	1940
59	818	0	18876	0	0	227326	4252	1860
60	831	0	17857	0	0	214437	4620	1860
61	844	0	11961	0	0	205311	4933	0
62	857	0	11436	0	0	196453	7272	1740
63	870	0	12107	0	0	220960	0	0
64	883	0	14150	0	0	204360	2319	1800
65	896	0	18378	0	0	197080	3106	2340
66	908	0	19915	0	0	203359	3308	2683
67	919	0	23290	0	0	189452	5192	3297
68	931	0	27182	1740	0	184778	7073	4296
69	943	0	20629	0	0	189519	6044	4400
70	954	0	14549	0	0	199463	4990	5168
71	962	0	10512	0	0	181717	0	6423
72	972	0	27609	0	0	183805	6295	5674
73	983	0	8966	0	0	203751	5980	0
74	1051	2040	30420	0	0	164797	4669	3073
75	1057	2640	27376	840	0	165316	4221	2623
76	1063	2670	25989	0	0	153619	4473	2640
77	1073	0	15270	0	0	168635	3659	2940
78	1084	0	15135	0	0	146858	5742	3336
79	1095	1500	20032	0	0	166330	6692	3604
80	1158	0	28153	0	0	199940	0	0
81	1174	1020	37776	0	0	193826	0	0
82	1302	0	19611	0	0	177881	286	4337

Annexe 22 : Tableau des pourcentages des minéraux dans les sédiments "Roche Totale" du sondage LLC2 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N° de l'échantillon	Profondeur en cm	Phyllosilicates	Quartz	Calcite	Dolomite	Argonite	Indosés
1	57	24.07	69.12	47.8	0	0	-40.99
2	67	40.3	3.82	0.79	0	0	55.09
3	78	39.26	2.76	0.62	0	0	57.37
4	89	42.43	2.02	0	0	0	55.55
5	100	31.22	2.39	1.49	0	1.34	63.56
6	111	39.07	3.93	0.7	0.48	0	55.82
7	123	42.22	2.71	0	0	0	55.07
8	134	38.22	3.47	0.43	0	0	57.88
9	145	22.96	1.5	0.61	0.4	0	74.32
10	161	46.05	3.04	0.81	0	1.65	48.45
11	173	52.71	3.44	0.62	0.43	0	42.8
12	184	26.61	3.11	0.48	0	0	69.8
13	196	27.49	3.18	0	0.39	0	68.94
14	208	39.08	1.78	0	0	0	59.14
15	213	50.79	2.64	0	0	0	46.58
16	225	40.19	2.28	0	0	0	57.53
17	237	33.86	1.77	0.35	0.37	0	63.64
18	248	32.95	2.19	0	0	0	64.86
19	259	57.43	3.52	0	0	0	39.05
20	268	32.39	2.32	0	0	0	65.28
21	286	24.59	1.82	0.34	0	0	73.25
22	303	39.09	1.97	0	0	0	58.95
23	320	25.71	1.6	0.31	0.36	1.34	70.69
24	337	31.92	1.64	0.31	0	1.21	64.92
25	355	42.07	2.23	0.42	0	0	55.28
26	372	21.71	1.29	0	0	1.95	75.05
27	388	10.42	0.56	0.42	0.4	0	88.2
28	399	9.29	0.51	0.53	0	0	89.67
29	409	11.95	0.41	0.47	0.34	0	86.83
30	419	32.07	4.67	0.42	0.39	0	62.44
31	432	45.96	6.61	0.39	0.45	0	46.59
32	443	40.73	3.34	0	0	0	55.93
33	457	26.16	1.51	0	0.55	0	71.77
34	466	45.76	8.76	0	0	0	45.47
35	476	43.54	3.15	0	0	0	55.3
36	488	43.51	3.94	0	0	0	52.54
37	501	32.18	1.83	0.45	0	0	65.55
38	513	41.74	1.28	0	0.41	0	56.56
39	525	0	0	0	0	0	100
40	537	18.91	1.64	0.33	0	0	79.13
41	549	18.56	1.47	0.41	0	1.8	77.76
42	562	30.36	2.66	0	0.59	0	66.39
43	574	32.46	3.71	0	0	0	63.83
44	590	29.94	4.29	0	0	1.57	64.21
45	605	35.68	6.22	0.38	0	0	57.72
46	621	51.67	9.52	0	0	0	38.81
47	636	18.18	4.21	70.05	0	0	7.56
48	651	23.18	7.43	64.42	1.43	3.63	-0.1
49	666	0	10.52	74.4	1.68	0	15.4
50	694	0	8.41	66.33	2.57	0	22.69
51	709	15.07	8.36	68.9	2.43	0	5.25
52	723	15.93	6.45	62.84	2.36	0	12.42
53	738	15.73	5.55	70.44	2.05	0	6.24
54	752	0	4.82	75.75	2.06	0	17.38
55	766	0	4.74	85.68	2.1	0	7.49
56	781	0	3.37	85.69	1.08	0	9.87
57	792	0	4.24	83.24	1.27	0	11.26
58	805	0	5.89	86.39	1.59	0	6.13
59	818	0	4.76	96.87	2.01	0	-3.64
60	831	0	4.36	88.54	2.12	0	4.98
61	844	0	2.86	83.05	2.22	0	11.87
62	857	0	2.68	77.86	3.2	0	16.26
63	870	0	3.01	92.79	0	0	4.2
64	883	0	3.37	82.42	1.04	0	13.17
65	896	0	4.3	78.06	1.37	0	16.27
66	908	0	4.79	82.64	1.49	4.17	6.91
67	919	0	5.43	74.71	2.27	4.98	12.61
68	931	0	6.29	72.37	3.08	6.44	11.82
69	943	0	4.84	75.17	2.66	6.68	10.65
70	954	0	3.51	81.3	2.26	8.07	4.86
71	962	0	2.45	71.63	0	9.69	16.23
72	972	0	6.42	72.27	2.75	8.54	10.02
73	983	0	2.14	82.18	2.68	0	13
74	1057	0	6.7	61.38	1.93	4.38	25.61
75	1057	0	6.03	61.56	1.75	3.74	26.93
76	1063	17.56	5.52	55.14	1.78	0	20.01
77	1073	0	3.36	62.69	1.51	0	32.44
78	1084	0	3.23	52.96	2.3	4.61	36.91
79	1095	0	4.45	62.48	2.79	5.18	25.09
80	1158	0	6.62	79.51	0	0	13.87
81	1174	0	8.74	75.81	0	0	15.46
82	1302	0	4.48	68.72	0.12	6.41	20.27

Annexe 23

Annexe 23 : Description des zones minéralogiques du sédiment total du forage LLC2 du Marais du Col-des-Roches (NEuchatel ; Suisse)

1.1.6.1. zone RT1 à calcite et dolomite (- 13, - 6,25 m)

75 % de calcite et 2 % de dolomite composent ce sédiment. Le quartz est également rencontré avec près de 5 % du sédiment total. 4 sous-zones peuvent être distinguées.

- *Sous-zone RT1a (- 13, - 9.80 m), début des argiles silteuses grises*

Elle se caractérise par l'absence de dolomite et phyllosilicates dans une première partie. Dans la seconde partie, vers 11.50 m, les pourcentages de dolomite sont plus élevés.

- *Sous-zone RT1b (- 9.80, - 8.75 m), fin des argiles silteuses grises*

La quantité d'aragonite atteint 10 %, puis diminue régulièrement. Le taux de dolomite présente une courbe identique à celle de l'aragonite mais décalée. Le taux de quartz diminue, puis augmente pour atteindre 5 %.

- *Sous-zone RT1c (- 8.75, - 7,5 m), les niveaux de gyttjas et de sables*

Le taux d'aragonite se stabilise à 2.5 %. Les pourcentages de la dolomite montrent un recul net alors que ceux du quartz progressent régulièrement.

- *Sous-zone RT1d (- 7,5, - 6,25 m)*

L'augmentation de la quantité de quartz et la diminution du taux de calcite caractérisent

cette zone. Le taux des phyllosilicates peut atteindre 20 à 25 % du sédiment total. La présence d'aragonite n'est pas constante.

1.1.6.2. zone RT2 à phyllosilicates et quartz (- 6,25, - 0,5 m), les tourbes

Cette zone est caractérisée par l'absence de calcite et la présence des phyllosilicates (35 % en moyenne). Trois sous-zones sont identifiées :

- *Sous-zone RT2a (- 6,25, - 5,25 m)*

La composition minéralogique est simple puisque seuls le quartz et les phyllosilicates sont identifiés. Les pourcentages de ces deux minéraux baissent de manière continue et passent respectivement de 10 à 0 % pour le quartz, et de 50 à 0 % pour les phyllosilicates.

- *Sous-zone RT2b (- 5,25, - 4,10 m)*

La dolomite entre de nouveau dans la composition sédimentaire sans atteindre 0.5 %. Dans cette zone, les taux de quartz dépassent 5 %. La quantité des phyllosilicates varie entre 30 et 50 %.

- *Sous-zone RT2c (- 4,10, - 0,5 m)*

Le début de cette sous-zone est caractérisé par une baisse des valeurs des phyllosilicates et du quartz. Les pourcentages de ces minéraux montrent ensuite une croissance plus ou moins variable. La dolomite et l'aragonite sont rencontrées irrégulièrement.

Annexe 24 : Tableau des intensités brutes en CPS (Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction <2 µm glycolée des sédiments du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N°	NIVEAUX	SM 001	M 001	M 002	M 004	M 005	CHL 001	K 001	CHL 002	CHL 003	CHL 004	QUARTZ	K 002	FK	ALBITE	PHYRITE	AMP
1	1025	0	520.8	199.6	44.3	126.3	92.5	88.3	95.6	45.1	103.1	114.0	95.4	54.6	126.1	33.4	33.1
2	1069	123.3	372.2	142.9	29.3	64.6	96.8	79.1	75	45.4	75.1	59.0	70.4	35	141.6	46	31.1
3	1117	0	348.4	124.2	31.5	78	84.1	64.4	73.6	36.5	79.1	67.2	60.1	51.5	142.2	50	26.5
4	1167	0	313.8	101.9	24.2	62.7	102.9	68.7	61.9	25.3	66.5	77	60.1	60.2	149.4	51.1	45
5	1262	768	264.5	95.1	22.8	64.7	82.9	140.4	79.1	24.2	78.8	77	100.2	62.1	55	72.2	0
6	1313	319.3	233.1	97.6	31	55.1	61.8	64.3	40.1	39.2	39.2	30.2	12.4	33.1	55.5	43	0
7	1342	1211.7	406.9	184	36.2	141.6	0	415.3	33	37.1	26	16	20.1	60.9	30.9	0	74.7
8	1364	0	294.3	129.9	24.2	80.8	81.9	144.9	64.2	19.9	68.5	30.6	154.6	60.5	24.2	20.7	0
9	1392	677.8	353.8	147.3	22	83.7	156.6	177.1	70	25.4	69.4	57.8	155.7	40.2	35.3	19.7	29.1
10	1426	772.5	374.8	171.3	29.4	103.9	118.5	211.2	83.3	34.3	83.1	43.4	100.4	65.2	31.8	49.6	0
11	1462	1109.6	448.7	178.9	39	127.2	0	302.9	81.1	27.8	79	60	200.1	92.6	23.5	0	0
12	1469	451.9	425.7	181.8	25.9	99.4	169.7	191.7	90.1	40.5	89.5	51.6	100.4	100.4	23.5	28	0
13	1489	232.9	490.6	206.7	36.5	124.9	98.6	140.9	88.7	25.7	79.5	12	12.4	63.9	118.5	23.4	0
14	1556	196.1	549.9	217.6	41.3	139.9	182.8	264	99.9	30	98.1	78.4	250.2	100.9	23.3	0	0
15	1582	449.9	495	241.6	45.6	163.8	202.7	189.7	72.6	36.7	104.5	79.6	250.2	98.6	28.9	0	0
16	1623	351.4	323	139.5	28.5	98.3	82.8	111.7	60.3	28.3	70.2	45.4	120.4	48.8	37	0	0
17	1652	525.9	460	199.6	47.1	118.7	124.1	201	85	39.3	84.8	57	200.4	77	26.6	29.4	0
18	1669	710.4	429.9	201.8	38.5	122.4	171.9	267.9	82.1	33.5	82.4	77.9	200.4	80.4	25	0	0
19	1693	812.2	402.1	166.9	30.7	96.1	0	205.9	101.9	26	102.5	73.4	200.4	77.2	28	0	0
20	1741	1014.1	378.6	166.8	26.4	98.4	295.9	256.2	110.6	27.4	108.5	69.7	251.5	100.2	26.9	0	0
21	1789	844	402.5	176.1	25.7	101.1	255	247.9	103	26.2	97.2	79.4	200.4	75.4	27	0	0
22	1832	770.8	451.9	197	29.9	112.8	214.5	333.3	0	43	0	81.6	200.4	100.5	35.6	0	0
23	1879	436.8	588.7	262	51.4	189.5	0	183.7	95.5	33.8	106.7	60.4	200.4	52.8	0	0	0
24	1897	748.5	480	215.6	33.8	130.8	183.9	298.1	99.2	30.8	99.2	77.7	200.4	90.6	40.5	0	0
25	1921	665.1	815.9	378.7	74.3	282.5	112	346.9	114.7	41	105.7	72.5	210.4	85.7	22.7	0	0
26	1983	452.9	735.1	342.5	54.5	228.4	108.5	290.8	108	46.1	109.4	65.9	200.4	57.2	29.2	32.7	0
27	2039	405.8	610.2	262.1	33.9	183.7	92.9	234.9	88.7	37.3	89.2	54.8	200.4	57.2	27.2	26.5	0
28	2075	0	374	128.6	21.3	77.3	133.1	122.1	81.7	29.2	70.1	34.5	100.4	48.2	26.5	39.5	0
29	2103	369	498.7	201.2	30.2	114.4	0	211	87.2	26.6	85.1	48.4	200.4	60.8	29.4	44.1	0
30	2219	350	546.8	219.6	38	130.4	86.7	215.5	80.6	25.7	71.8	30.5	190	51.6	26.4	0	0
31	2230	0	843.5	339.1	62.3	226	92.1	241.2	116.4	35.5	101.4	70.3	221.5	70.6	35.5	0	0
32	2290	427.7	988.2	452.8	73.1	310.9	161.1	309.2	136.7	56.6	134	66.7	300	78.3	43.7	27.9	0
33	2278	313.4	1697.1	780.3	126.6	560.2	124.2	373.3	195.5	101	200.8	252.4	383.4	21.9	65.7	0	0
34	2322	469.9	557	245.6	52.7	167.9	107.7	291.7	100.5	30.3	87	64.9	252.4	75.1	34.1	21.9	0
35	2553	0	553.4	229.8	45.2	146.2	123.4	136.2	71.9	30.2	79.2	45	150	48	23.2	25.7	0
36	2677	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	2705	0	295.3	139.8	27.3	73.3	186.2	281.4	0	21.3	0	53.9	201.9	64.9	25.6	30.3	0
38	2833	902.4	309	352.9	27.5	104.8	305	376.8	0	36	0	80.9	244.4	100.5	38.9	19.7	0
39	2855	870.5	223.1	108.3	24.3	82.8	100.8	253	69.2	25.9	64.2	77	244.6	83.5	26.3	26.2	0
40	2972	579.3	573.3	292	49.3	183.7	0	450.1	0	47.9	0	82.9	289.8	21.9	37	0	0
41	3032	448.3	450.4	204.8	29.8	127.4	107.8	205.6	98.7	33.1	82	60.2	169.7	33	31.5	0	0
42	3028	510	506.8	220	38	153.9	105.7	174.6	84.6	38.8	89.2	59.7	184.2	57.4	21.3	34.4	0
43	3058	486.1	557.1	225.6	54.5	132.8	109	134.5	98	47.4	90.1	52.6	125.7	37.6	31	21.6	0
44	3075	257.3	445.4	186	35	110.6	79.3	133.9	85.4	34	81.6	59.5	127.9	29.1	21.4	20.8	0
45	3104	276.5	258.9	96.1	23.9	63.3	61.4	108.8	50.2	0	45.3	44	98.2	50.1	24.2	62.1	0
46	3121	0	199.4	86.7	24.3	47.4	52.9	51.6	35.2	22.5	40.4	34.8	59.3	25.7	22.8	71.9	0
47	3144	0	265.3	96.7	25.3	67.8	48.3	68.3	56.5	31.3	54	39.3	65.3	30	25.6	30.3	0
48	3194	0	285.1	108.3	27.2	67.7	70.4	97.5	47.7	21.6	45.3	48.5	92.6	22.7	29.3	142.1	0
49	3223	343.5	332	138.7	32.7	73.1	104.7	115.3	75.9	35.1	71	42.8	107.9	44.6	21.1	19.7	0
50	3263	280.7	402.4	168	29.3	96.8	95.8	126.8	82.8	35.6	74.5	38.9	114.2	28.2	26.3	23.4	0
51	3290	339.2	514.3	200.3	33.7	114.7	102.7	141	82.6	41	80.4	62.6	137.2	56.9	28.4	0	0
52	3314	389.1	548.5	210.9	40.4	122.3	115.6	172.9	101.4	35.2	97.5	69.8	166.3	72.4	29.3	22.5	0
53	3346	136.1	515.9	223.8	28.6	114.8	104.1	175.9	95.6	34.2	90.6	63.5	166.6	61.1	28	23.1	0
54	3378	365.9	432.5	183.3	38.5	112.6	113.4	175.3	92.7	29.2	88.7	63.8	167.8	71.8	23.5	132.9	0
55	3412	0	308	117.8	24.6	76.6	59.4	121.7	120.1	30.4	69.5	30.9	73.2	33.4	25	89.8	0
56	3429	373.4	397.6	157.3	29.4	101	101.4	283.6	0	27.2	0	60.2	192.6	68	28.8	39.5	0
57	3503	203.9	626	279.9	40.6	135.1	112.2	338.3	121	43.9	119	63	332.6	64.5	29.8	19.4	0
58	3538	341.9	467.3	191.7	30.4	109.2	86.8	302.7	32	33.6	21.8	65.9	205.9	48.6	23.7	23	0
59	3577	136.5	332.4	252.6	40.7	142.7	73.3	328.8	120.5	28.2	111.7	55.6	304.8	31.8	33.2	20.3	0
60	3608	342.9	502.7	213.6	35.2	126.2	77.6	218.5	94.2	26.4	93.5	58	216.8	62.4	21.2	30.1	0
61	3810	312.8	404.7	154.5	35	88.2	107.6	144.6	77.8	34.3	76.8	48.2	142.7	62	28.3	37	0
62	3849	244.8	450.4	206.4	45.8	121.3	91.1	194.8	79.8	39.6	88.3	55.5	215.6	48.7	29.1	93.9	0
63	3875	232.1	508.2	188.3	48.9	119.4	121.1	231.8	106.2	34.5	102.2	55.2	235.2	36.7	25	0	0
64	3901	143.5	591.4	233.9	42.8	150.4	66.3	378.4	0	36.4	0	67.7	275.3	76.8	39.9	0	0
65	4037	184.3	366.7	157	28.3	89	113.9	168.6	82.4	28.7	81.8	55	167.4	54.7	24.2	24.4	0
66	4066	393.4	432.5	203.6	37.5	135.8	61.6	224.3	74.8	28.2	73.5	69.5	220.4	58.7	37.4	39.7	0

Annexe 25

Annexe 25 : Description des zones minéralogiques des fractions argileuses du forage LLC1 du Marais du Col-des-Roches (NEuchatel ; Suisse)

1.2. MINÉRALOGIE DES FRACTIONS MINÉRALES ARGILEUSES < 2 µm

1.2.1. La fraction minérale argileuse < 2 µm du forage LLC 1

1.2.1.1. Les zones à smectoïdes, à micas et à chlorite

- Zone F2-1 à kaolinite (-41, -34.50 m)

Seules les intensités brutes de la kaolinite varient et présentent deux maxima dans cette partie du forage.

- Zone F2-2 à albite et pyrite (-34.50, -33 m)

Une hausse des intensités des minéraux en grains, principalement de l'albite et de la pyrite, caractérise cette zone. Les valeurs des smectoïdes, à l'opposé, régressent un peu. La quantité de kaolinite diminue également (ses intensités brutes diminuent d'un tiers).

- Zone F2-3 à micas et smectoïdes (-33, -32 m)

Les intensités des smectoïdes sont stables. Les valeurs des micas, de la kaolinite et de la chlorite baissent légèrement. La quantité des minéraux en grains diminue fortement par rapport à la zone F2-2.

- Zone F2-4 à micas, albite et pyrite (-32, -31 m)

Elle est caractérisée par la disparition des smectoïdes et par la hausse des intensités brutes de la pyrite et de l'albite. Les intensités de la kaolinite régressent.

- Zone F2-5 à smectoïdes et kaolinite (-31, -29.5 m)

Cette zone se différencie par la brusque augmentation des intensités de la kaolinite de 100 à plus de 400 CPS. Les valeurs des intensités brutes des autres argiles sont également plus élevées dans cette zone.

- Zone F2-6 à micas et kaolinite (-29.5, -19 m)

Vers - 28 m, les intensités brutes des smectoïdes et de la kaolinite augmentent ; vers - 22 m les valeurs des micas montrent une chute importante.

- Zone F2-7 à smectoïdes (-19, -16 m)

Dans cette zone, les intensités des smectoïdes sont élevées (avec environ 1500 CPS) elles diminuent ensuite. Les intensités brutes de la chlorite atteignent un maximum de 300 CPS puis décroissent. Les intensités de la kaolinite et des feldspaths potassiques sont dispersées.

- Zone F2-8 à smectoïdes et minéraux en grains (-16, -14.5 m)

Les intensités des smectoïdes montrent une décroissance ; celles du quartz et des feldspaths potassiques augmentent faiblement puis régressent.

1.2.1.2. Les zones à amphiboles

- Zone F2-8 à smectoïdes et minéraux en grains (-14.7, -12 m)

Cette zone est caractérisée par l'identification de l'amphibole dans le cortège des minéraux accessoires. La quantité de kaolinite et celle des micas décroît légèrement. Les intensités des smectoïdes et des chlorites varient beaucoup dans cette zone.

- Zone F2-9 à minéraux en grains (-12, -10 m)

Les smectoïdes ne sont pratiquement plus présents dans la fraction argileuse. Les intensités brutes de la kaolinite et des chlorites se sont stabilisées à 100 CPS. Par contre, les micas et le quartz augmentent (vers 12 m). Les autres minéraux en grains pourraient présenter une tendance inverse.

Annexe 26 : Tableau des intensités brutes en CPS (Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction 2-16 μm des sédiments du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N°	NIVEAUX	M 001	M 002	M 004	M 005	CHL 001	K 001 mesuré	K 001 calculé	CHL 002 calculé	CHL 003	CHL 004	QUARTZ	K 002	FK	ALBITE	PHYRITE	AMP	PARAGO
1	1025	958.4	312.4	54.2	205.7	78.4	-	78.7	183.1	61.6	120.5	1328.6	64.4	82	418.6	62	146.6	30
2	1069	94.8	328.8	64.3	226	94.8	-	120.2	237.1	76.2	142	292.8	38	111.8	564.3	154.2	181.5	28
3	1117	1109.2	301.9	59.4	203.5	79.9	-	100.2	174.7	63	123.4	219.6	34	81.5	620.1	231.6	201.3	0
4	1167	1073.8	318.6	64.7	227.2	101.6	-	111	256.5	86.7	179.1	246.3	49.7	103.2	558	65.4	176.8	26
5	1262	1024.9	471.6	68.8	78.4	83	281	83.6	197.4	114.2	201.7	502.1	85.4	116.6	253.1	59.8	83.8	0
6	1313	564.3	263.3	45.5	159.2	74.7	246.1	70.5	175.6	70.5	162.5	255.3	65.3	66.6	49.2	45.3	0	0
7	1342	896.9	484.1	83.2	87	133.1	392.5	142.7	249.8	126.7	283.7	806.2	162	135.5	77.2	0	0	0
8	1364	724	339.5	47.2	220.6	93.7	276.8	107.3	169.5	95.5	184.7	393.8	117	96.7	59.7	28	0	0
9	1392	1130.3	485.5	78.7	278.2	144	415.9	127.5	288.4	127.4	261.6	474.3	115.7	141.9	81.7	30.5	0	0
10	1426	746	419.4	73.1	293.5	79	312.9	93	219.9	120.2	270.3	703	114.3	124.3	89.2	64.1	0	37
11	1462	957.1	513.4	88.2	403.1	118.7	381.6	143.7	237.9	130.1	278.2	823.2	168.1	166.4	87.9	0	0	0
12	1469	610.3	358.4	64.3	280	59.5	259.4	85.3	174.1	84.8	230.3	623.7	112.8	103.8	76.8	0	0	0
13	1489	1221.7	433.9	57.8	254.5	121.5	360.3	111.2	249.1	107.6	203.8	355.4	91	119.1	52.3	68.6	0	0
14	1556	3014.1	1080.4	176.4	747.3	202.9	585.8	266.5	319.3	180.1	368.4	343.3	307.4	169.3	75.4	0	0	76
15	1582	3383.4	1271.7	207.9	825.8	240.6	767.2	259.3	507.9	235.8	476	444.9	243	203.6	90.3	0	0	55.3
16	1623	875.9	345.2	51.6	222.9	79.7	270.5	96.5	174	78.8	169.1	276.1	93.8	98.3	34.5	24.9	0	0
17	1652	918.9	394.8	69	261.6	98.1	331	133.8	197.2	82.5	192.3	504.9	130.4	140.5	60.3	0	0	0
18	1669	2736.5	1157.1	185	752.6	229.8	769.1	282.1	487	200.9	432.7	632.9	250.7	287.2	113.9	0	0	71
19	1693	2666.2	1105.6	192.9	738.7	212.7	672.6	235.9	436.7	211.6	452.6	506.4	244.5	239.3	139.3	0	0	64
20	1741	2562.1	1064.8	176.8	728.5	203.2	686.8	246.3	440.5	202.9	392.6	698	219.5	400.9	239.4	0	0	66
21	1789	3413.9	1115.3	243	938.3	254.9	773.6	228.8	544.8	212.9	480.6	729.2	201.8	330.7	175.6	0	0	87
22	1832	3387.8	1346.3	202.6	854.4	236.4	801	299	502	225.8	436.8	589.3	260.2	285.5	183.4	0	0	88
23	1879	1339.3	540.2	92.6	373	102	355.7	124.3	231.4	120.8	223.6	420.9	120.1	153.9	59.8	36.9	0	44
24	1897	3576.8	1426.5	218.6	845.8	231.8	759.4	262.1	497.3	220.9	441.8	510.3	232.8	273.3	0	0	0	81
25	1921	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	1983	1838.8	788	61.5	475.1	147.3	567.5	176.3	391.2	165.6	352.3	359.6	158.8	158.9	125.5	33.2	0	0
27	2039	894.4	407.1	67.7	286	105.2	323.5	129.8	193.7	116.4	210.1	520.5	140.8	143.5	68.8	49.9	0	0
28	2075	800.7	296.6	67.8	184.9	76	191.3	69.9	121.4	75	130.8	112.1	75.3	68.5	0	63.7	0	0
29	2103	1314.6	518.7	94.8	368.3	102.3	454.2	309	145.2	66.5	139.5	81.4	296.8	91.6	0	0	0	31
30	2219	1570.9	567.7	83.1	320.8	113.8	342.8	136.4	206.4	98.3	238.3	238.3	157.5	123.3	76.9	60.2	0	41
31	2250	2193.9	810.8	124.4	488.5	175	488.9	199.3	289.6	139.2	286.5	340.4	197.2	172.8	0	0	0	45
32	2270	4416.4	1759.3	275.9	1137	301.5	945.6	296.1	650.5	304.8	565.5	705.9	257.4	378.6	277.1	63.3	0	91
33	2278	4819.5	1889.1	288.3	1203.7	337.9	1050.2	339.2	711	325.7	638	666	304.4	315.3	256	0	0	135.6
34	2522	687.9	303.1	44.5	190.4	67.9	216.5	78	198.3	54.7	123.3	426	111.7	103	0	0	0	33.3
35	2553	565.8	193.6	24.7	132.3	56.2	210.7	138.8	71.9	30.5	65.9	51.3	127.2	0	0	23.4	0	0
36	2677	3803.3	1461.9	223.7	920.3	263.7	811.5	258.4	553.1	236.3	494.9	484.7	231.2	265.2	182.9	31.4	0	99
37	2705	807.9	352.7	51	228.5	81.9	220.8	93	127.8	51.3	134.3	259.2	97.8	129.7	78.7	36.8	0	0
38	2833	2518.9	1019.1	154.9	630	180.9	525.2	188.7	336.5	136.6	272.1	523	152.6	231.6	240.5	0	0	53
39	2855	1229.9	494.4	98.9	326.7	109.8	251.5	101.8	149.5	82.3	162.9	364	111	193.4	126.9	0	0	28
40	2972	3567.4	1431.6	217.4	843.5	229.9	633.4	208.2	425.2	197.9	435.6	550.4	213.3	269.9	307.5	0	0	79.7
41	3002	2523	962.4	158.5	595.5	167.4	431.1	142.5	288.6	145.1	300.1	371.4	148.2	198.3	134.4	32.4	0	63.3
42	3028	2390.6	1104	175.7	657.2	131.8	587.4	158.2	439.2	177.8	377.1	453.2	139	229.9	254.6	29.7	0	66.3
43	3038	2635.9	1124.8	168.3	662.8	176.3	609.7	167.4	442.3	195.6	377.8	419.7	143	242.3	283.6	0	0	67.9
44	3075	1829	672.5	98.9	366.7	125.4	386.2	118.4	267.8	123.3	231.1	250.5	102.2	156.4	166.7	0	0	44.5
45	3104	615.1	245.3	38.5	156.5	56.1	174.6	76.3	98.3	52.4	98.3	332.8	76.3	80.7	82.8	69.9	0	0
46	3121	606.6	232.7	25	120.2	57.6	158	49.9	108.1	57.1	102.7	134.9	47.4	0	0	110.4	0	23.2
47	3144	1173.5	456.2	65.5	244.3	117.5	369	115	254	99	209	351.5	94.6	0	0	44.4	0	37
48	3194	404.9	213.9	40.8	153.8	32.8	148.5	46.8	101.7	54.8	115.3	294.1	53	76.5	27.4	99.9	0	0
49	3223	1505.9	550.7	91.1	345.4	137.1	459.7	110.5	349.2	130.3	282.2	240.8	89.3	126.7	86.5	0	0	42.5
50	3263	2581.6	996.6	144.5	646.2	213.3	645.3	43.9	601.4	173.9	1846	329.2	134.9	216.9	93.5	0	0	63
51	3290	3384.3	1296.5	196.6	799.3	264.4	746.2	212.9	533.3	250.4	511.5	422.6	204.3	238.3	225.4	0	0	73.9
52	3314	3807.3	1449.6	205.6	845.1	294.8	774	254.2	519.8	253.2	485	457.2	237.2	260.5	252.7	0	0	122
53	3346	3263.6	1226.5	193.9	815.6	240.7	687.9	236.3	451.6	193.6	412.4	460.4	215.8	287.8	259.2	782.8	0	90
54	3378	3403.3	1312.7	207.7	865.9	245.6	750.2	250.7	499.5	201.2	450.5	509.1	226.1	268.5	149.6	412.8	0	84
55	3412	677.9	241	45.7	186.9	103.2	255.4	64.5	131.1	97.9	176.1	105.4	59.2	65.3	73.1	217	0	0
56	3429	1755.1	682.3	90.3	397.5	133.9	402.3	149.7	252.6	127.3	247.8	347.7	146.8	0	0	47	0	0
57	3503	3361.2	1465.9	206.5	903.5	222.7	881.5	362.5	519	243.2	508.7	880	355.3	352.7	185.9	0	0	77
58	3538	2780.7	1028.7	161.8	635	192.7	574.4	204.9	369.5	150.3	359	451	199.1	222.3	94.4	47.9	0	56
59	3577	3296.3	1333.4	205	838.6	217.7	791.5	356.6	454.9	201.6	485.8	782.3	359.4	283.7	107.5	0	0	0
60	3608	2439.8	965	144.5	614.8	198	588.2	211.3	376.9	181.2	409.6	374	229.7	171.5	89.3	59.7	0	0
61	3810	1775.4	668.6	95.7	416.9	139.5	403.2	165.2	238	122.7	238.4	251.7	165.5	110.2	88.6	45.9	0	0
62	3849	1761.9	724	123.6	465.9	149.6	487.5	182.2	305.3	137.4	305.2	455	182.2	167.5	61.3	208	0	0
63	3875	1912.8	903.4	132.8	556.6	130.9	524.8	197.2	327.6	162.3	290	474	174.6	165.9	69.6	29.3	0	0
64	3901	2521.5	989.2	180	665.2	202.2	710.4	267.6	442.8	198.4	418.4	539.6	252.9	183.1	67	45.8	0	0
65	4037	1492.9	575.4	77.2	301.2	140	374.1	134.1	240	101.8	244.4	335.4	136.6	168.6	111.6	0	0	0
66	4066	1464.7	578	97.7	368	99.8	300	109.8	190.2	87.9	198.9	320.9	114.8	100.4	53	30.1	0	0

Annexe 27

Annexe 27 : Tableau des intensités brutes en CPS (Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction <2 μ m glycolée des sédiments des sondages jumeaux LLC1-3/4 et LLC1-5 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

Sondage	Niveau	IS	MOO1	MOO2	MOO4	MOO5	CHL001	K001/CHL002	K001 calculé	CHL002 calculé	CHL003	CHL004	QUARTZ	K002	FK	ALBITE	PYRITE
LLC1-3	865	426	670.2	277.5	49.7	189.9	194.8	405.4	276.8	128.6	234.4	139.2	85.1	290.5	0	0	65
LLC1-3	875	224.7	363.6	136.9	22.9	74.7	103.8	188.1	119.7	68.4	123.7	65.6	74.9	114.7	8.1	0	38.7
LLC1-4	885	162	279.9	89.8	28.7	69.4	82.8	147.7	102.5	43.2	93.1	40.3	60.2	91.4	4.2	55	38.8
LLC1-4	895	132.7	219.7	81.1	21.5	48.3	64.6	123.9	77.5	46.4	70	51.2	54.4	85.6	50	21	23.8
LLC1-4	905	72.9	181.7	70.1	20	38.8	64.9	102.6	54.9	47.7	73.7	47	46.7	54	26.5	20.9	31
LLC1-3	915	69.6	242.4	78.8	20.2	43.3	50.8	116.8	74.5	42.3	89	44.3	52.7	76.1	27.3	24.3	25.5
LLC1-3	925	-	304.7	103.9	29.8	64.7	49	158.3	100.4	57.9	126	69	45.3	119.5	4.1	36.8	32.2
LLC1-3	935	56.1	345.6	120.8	20.6	76.4	94	154	98.0	56.0	137.2	51.8	50.1	90.7	19.4	42.4	57.1
LLC1-4	945	113.9	314	109.4	27.9	76.2	68.8	172.4	105.8	66.6	111.6	58	54.9	92.1	11.7	23	23.6
LLC1-4	955	-	266	96.6	24.4	60.2	0	116.7	71.4	43.3	61.4	49.9	53.6	76.6	33.6	29.5	37.9
LLC1-3	965	35.3	125.9	47.2	23	30.9	45.5	1001.6	686.7	314.9	94.7	40.4	40.9	68.1	19.3	35.1	55.9
LLC1-3	975	62	338.7	118.6	33.3	74	61.2	137.9	82.0	55.9	112.4	60.3	41.8	68.8	0	22.6	60.1
LLC1-3	985	108.6	434.1	155.3	29.3	98.1	108.3	228.3	132.0	96.3	165.4	101.1	53	138.5	52.6	42.6	168.5
LLC1-4	995	-	256.6	98.5	29.3	64.2	78.3	123.6	72.0	51.6	87	65	49.8	90.8	56.8	37.9	97.3
LLC1-4	1005	56.8	106.1	39	27.2	28.9	53.3	54.8	28.5	26.3	37.8	33.6	20	36.5	30	21.8	21.5
LLC1-3	1025	51	243.5	87.9	30.1	63.6	53.2	116.4	56.0	60.4	109.4	69.1	41	64	25.2	25.8	139.7
LLC1-3	1035	300.6	564.1	207.4	36.5	122.1	197.4	272.1	165.9	106.2	232.4	106.4	77.4	166.3	78.4	54.3	96
LLC1-4	1045	83	606.5	273.8	42.9	154	190.6	265.9	125.3	140.6	259	135.3	87.7	138.3	56.9	56.7	93.6
LLC1-4	1055	195.7	638.1	235.6	47.1	163.6	183	283.5	164.3	119.2	227.4	125.8	77.4	173.3	72	57	101.9
LLC1-3	1065	283.4	689.1	258.3	51.6	167.1	208	256	137.4	118.6	266.2	122.6	82.2	142	77.5	67.6	67.2
LLC1-3	1075	114	524.2	22.8	33	124.1	153.5	191.1	88.3	102.8	179.5	103.4	77.3	88.9	46.8	48.1	62.2
LLC1-3	1085	159.3	643.7	241.7	35.6	148.6	138.4	222	111.0	111.0	216.4	130.1	69.2	130.2	57.6	51.4	102
LLC1-3	1095	-	335.6	107.8	23	58.8	116.7	125.8	68.9	56.9	98	46.7	54.2	56.6	40.2	28.7	24.3
LLC1-4	1105	217.5	320	196.9	29.7	124.9	173.4	192.3	88.0	104.3	201.4	116.5	64.4	98.2	62.2	46.6	41.6
LLC1-3	1115	103.8	474.3	183.7	30	112.2	131.9	182.6	95.1	87.5	162.1	106.1	69	115.3	52.4	37.3	52.7
LLC1-3	1125	234.8	364.6	132.8	34.9	82.9	146.5	172.3	101.8	70.5	146.7	73.4	69.7	106	56.2	30.2	115.3
LLC1-3	1130	281.1	415.6	147.6	27.9	91.8	135.7	159.7	80.6	79.1	134.6	83.6	56.9	85.2	47	49	89.5
LLC1-4	1135	155.4	246.4	91.1	22.7	63.8	81.3	97.3	46.4	50.9	96.9	49.1	58.9	44.7	38.2	26.4	57.3
LLC1-3	1137	388.2	472.1	166.6	36.8	95.4	150.4	181.4	103.8	77.6	165.9	84.5	52.1	113.1	66.3	53.3	80.1
LLC1-4	1145	219.8	401.8	142.8	24.8	92	99.8	142.1	82.6	59.5	141.9	67.4	61.1	93.7	49.3	39.5	79.1
LLC1-4	1155	297.3	585	235	37.5	144.8	152.4	199.2	105.7	93.5	195.2	94.8	72.5	107.2	60.6	64.9	22.6
LLC1-3	1165	445.6	746	296.3	58.8	222.5	323.7	339.5	197.5	142.0	278.4	150.7	95.3	209.5	112.2	79.1	94.1
LLC1-3	1175	401.6	592.2	229.1	43.9	147.3	187.9	251.5	154.6	96.9	197.9	114	105.3	181.9	102.3	77.8	59.3
LLC1-5	1160	346.4	580.9	275.6	-	-	269.1	292.2	176.0	116.2	82.8	128.9	91.8	195.2	0	-	-
LLC1-5	1170	252.4	543.4	235.8	-	-	142.7	211.5	109.7	101.8	55.1	128.2	63.8	138.1	0	-	-
LLC1-5	1180	408.6	515.6	244.4	-	-	172	248.9	142.9	106.0	128.6	119.8	80.8	161.6	0	-	-
LLC1-5	1190	137.1	346.1	137.7	-	-	113.8	148.1	85.7	62.4	28.8	67.9	54.8	93.2	0	-	-
LLC1-5	1205	95.7	302.6	114.8	-	-	110.8	120.4	63.6	35.8	27.8	64.4	48.3	72.1	46.8	-	-
LLC1-5	1210	264.6	321.3	118.6	-	-	103.6	123.6	74.0	49.6	32.2	67.8	56.3	101.3	0	-	-
LLC1-5	1215	301.6	283.1	128.5	-	-	101.5	125.2	66.1	59.1	25.7	92.5	37.2	103.5	66.1	-	-
LLC1-5	1220	242.7	286.4	119.3	-	-	117.1	121.2	60.9	60.3	35.2	79.8	34.8	80.5	0	-	-
LLC1-5	1225	330.5	360.3	157	-	-	136.7	170.2	99.6	70.6	44.3	80.6	56.7	113.7	0	-	-
LLC1-5	1230	530	358.5	138	-	-	152.6	197.2	69.1	128.1	106.3	229.4	340	123.8	0	-	-
LLC1-5	1235	378.5	299	122.8	-	-	104	119.9	65.4	54.5	99.7	62.9	452	75.6	0	-	-
LLC1-5	1240	407.7	235.7	114.8	-	-	133.1	123.6	72.7	50.9	102.9	61.4	237	87.7	53.7	-	-
LLC1-5	1245	416.2	171.7	79.2	-	-	76.5	120.8	58.0	62.8	50.9	80.6	32.5	74.4	56.6	-	-
LLC1-5	1255	566.1	311	120	-	-	98	172.4	106.5	65.9	33.3	72.8	45.3	117.7	0	-	-
LLC1-5	1260	173.8	840.1	331.4	-	-	143.4	318.3	89.5	229.3	108.2	182.6	190.6	70.9	0	-	-
LLC1-5	1265	718.2	303.6	122.2	-	-	125.4	218.5	184.0	34.5	36	29.4	39.2	157	0	-	-
LLC1-5	1270	1021.6	378.5	186.5	-	-	147.4	359.9	172.9	187.0	137.2	285.4	664.2	264	0	-	-
LLC1-5	1275	1184.9	389.5	179.6	-	-	30.5	359.4	244.9	114.5	153.9	117.9	439.5	232.1	0	-	-
LLC1-5	1280	676.5	280.8	108.2	-	-	181.9	189.3	118.9	70.4	39.3	75.7	63.9	127.8	0	-	-
LLC1-5	1285	1628.9	425.5	179.9	-	-	150	432.4	359.5	72.9	37.5	62	75.8	305.5	0	-	-
LLC1-5	1290	1069.1	282.3	110.7	-	-	104.6	174.3	113.9	80.4	26.3	64	45.1	120.8	0	-	-
LLC1-5	1295	741.2	269.5	119.3	-	-	109.2	239.4	171.8	67.6	27.1	64	39.4	162.7	0	-	-

Annexe 28 : Description des zones minéralogiques de la fraction argileuse et des minéraux en grains < 2 µm des forages LLC 1-3/4 et 5 du Marais du Col-des-Roches (Neuchâtel ; Suisse)

1.2.3. Étude de la fraction argileuse et des minéraux en grains < 2 µm des forages LLC 1-3/4 et 5

1.2.3.1. Les zones à smectoïdes et à minéraux en grains

- zone F2-1 (-13, -12.80 m)

Les valeurs des smectoïdes augmentent de 1000 CPS (de 500 à 1500 CPS). C'est dans cette zone que leurs intensités brutes sont les plus fortes. Les intensités brutes des micas et des chlorites sont nettement plus faibles. Les intensités des minéraux en grains sont relativement faibles par rapport aux phyllites.

- zone F2-2 (-12.80, -12.65 m)

Cette zone est caractérisée par des intensités de smectoïdes décroissantes et par une hausse des intensités brutes du quartz (700 CPS). Les intensités des micas, des chlorites et de la kaolinite augmentent également.

- zone F2-3 (-12.65, -12.55 m)

Elle est caractérisée par les valeurs les plus élevées des micas (800 CPS) et des intensités en smectoïdes qui ne dépasseront plus les 500 CPS.

1.2.3.2. Les zones à micas, chlorite et kaolinite

- zone F2-4 (-12.55, -12.40 m)

On observe dans cette zone une hausse des intensités brutes des feldspaths potassiques et de la pyrite. Les intensités brutes des argiles régressent.

- zone F2-5 (-12.40, -12.20 m)

Une augmentation des intensités brutes du quartz et de la pyrite permet de différencier cette zone.

- zone F2-6 (-12.20, -11.60 m)

Dans cette zone, on observe une hausse progressive des intensités des micas, des chlorites et de la kaolinite jusqu'à des maxima respectifs de 800, 300 et 200 CPS à 11.60 m. La présence de feldspaths potassiques est sporadique. Les intensités de la pyrite passent par des valeurs basses en milieu de zone.

- zone F2-7 (-11.60, -10.90 m)

Les intensités brutes des argiles diminuent régulièrement dans cette zone. Les feldspaths potassiques sont de nouveau présents de façon constante avec des valeurs faibles, voisines de 50 CPS. Les intensités de l'albite sont légèrement plus élevées ; celles de la pyrite augmentent progressivement.

- zone F2-8 (-10.90, -10.25 m)

Cette zone se différencie par des intensités brutes des minéraux argileux, des feldspaths et de la pyrite plus élevées que dans la zone F2-7.

- zone F2-9 (-10.25, -9.00 m)

Le début de la zone est caractérisée par des valeurs d'intensités brutes plus basses qui vont rester relativement stables tout au long de la zone.

- zone F2-10 (-9.00, -8.60 m)

Cette zone se caractérise par l'augmentation des intensités brutes des argiles, du quartz et de la pyrite. Les feldspaths augmentent, puis ne sont plus identifiés.

Annexe 29

Annexe 29 : Tableau des intensités brutes en CPS (Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction 2-16 µm des sédiments des sondages jumeaux LLC1-3/4 et LLC1-5 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

Sondage	Niveaux	MOO1	MOO2	MOO4	MOO5	CHL001	K001/CHL002	K001 calc	CHL00 2 calc	CHL003	CHL004	QUARTZ	K002	FK	ALBITE	PYRITE
LLC1-3	865	202	71	37	36.8	87	67.6	36.6	31.0	22	61	20.6	72	29.6	0	0
LLC1-3	875	597.6	227.6	45.6	187.7	281.5	378	235.4	142.6	63.3	132.7	201.1	252	111.8	81.9	204.9
LLC1-4	885	394.9	175.9	28.9	129.5	88	209.5	104.8	104.8	45.5	146.7	167.6	146.7	65.8	42.6	191.5
LLC1-4	895	193.9	63.9	20	34.2	54	95.2	48.9	46.3	16	48.1	51.1	30.9	41	27	0
LLC1-4	905	463.3	182.2	21.3	105.9	71.2	133.6	65.3	58.3	49	84.9	80.2	81.2	62.7	33.2	80.1
LLC1-3	915	150.3	47.4	23.6	32.2	31.2	65.2	25.4	39.8	20	32.2	65.5	20.5	45	44	35
LLC1-3	925	582.4	219.4	39.1	153.8	55.1	160.7	77.7	83.0	45.3	101.5	99.1	95.1	65.9	32.7	74.6
LLC1-3	935	197.9	112.6	28.2	80.3	33.8	80.8	41.0	39.8	30	53.5	125.8	55	54.9	25.3	92.1
LLC1-4	955	191.8	86.5	32	64	45	67.1	32.9	34.2	20	40.2	99.1	38.6	49.7	31.8	127.2
LLC1-3	965	287.3	128.1	28	91.6	44.5	104.5	39.2	65.3	27	75.2	79	45.2	25.3	0	48.8
LLC1-3	975	164.1	78.9	22.8	65.9	31.2	59.1	26.8	32.3	17	31.5	89.2	26.1	49.7	45	53.9
LLC1-3	985	107.4	50.2	25.5	59.8	38.9	61	32.9	28.1	23.1	52.3	146.6	61.4	60.9	47	167.9
LLC1-4	995	263.1	98.5	26.2	70.3	33.3	88	35.4	52.6	20	67.8	74.1	45.6	126.2	48.8	46.7
LLC1-4	1005	314.5	129.2	33	75.2	34.7	109	52.5	56.5	18	75.9	74.4	70.4	55	42.6	139
LLC1-3	1025	357.5	144.5	26.7	98.5	57	103.2	38.0	65.2	27	86.3	73	50.2	38.8	36.6	83.8
LLC1-3	1035	646.1	237.1	34.1	157.8	96	193.1	68.7	124.4	23.9	123.4	95.8	68.1	65.5	68.7	96.6
LLC1-4	1045	772.5	324.6	54.5	227.9	154.1	316.6	105.5	211.1	36.3	229.1	237.3	114.5	79.3	81.9	142.2
LLC1-4	1055	567.1	246.9	38.8	174.6	147.2	187.5	75.4	112.1	72.2	157.6	172.7	106.1	80.8	62	606
LLC1-3	1065	676.8	308.4	51	229.8	192.3	260.9	97.2	163.7	75.2	189.1	233.3	112.3	92.8	88.9	371.8
LLC1-3	1075	465.2	250.1	41.5	192.6	174.2	226.6	97.0	129.6	85.9	176.3	206.3	132	87.8	97.3	308.4
LLC1-3	1085	852	288.5	42.9	172.6	90.5	180.7	55.4	125.3	27.2	129	117.2	57	59.3	74.2	757.8
LLC1-3	1095	643.9	254.1	44.3	155.8	100	221.3	71.1	148.2	21.1	144.9	182.7	71.4	49.9	79.1	605.5
LLC1-4	1105	623.3	272.8	52.6	186.7	174.9	231.8	77.3	154.5	30	182	322.7	91.1	106.9	130.5	252.4
LLC1-3	1115	530.4	247.3	51.1	186.2	246.7	272.5	126.8	145.7	80.3	191	225.3	166.3	102.6	84.6	217
LLC1-3	1125	478	203.5	47.9	145	233.8	208.1	97.8	110.5	29.1	134	285.5	118.8	81.8	68.3	131.8
LLC1-3	1130	750.1	273.6	57.8	184.5	122.2	258.5	79.6	178.9	78.6	162.4	226.9	72.2	90.2	90.7	149.9
LLC1-4	1135	559.3	222.1	29.1	138.2	156	220.9	79.1	141.8	75.2	147.6	195.7	82.3	64.2	54.7	168.9
LLC1-3	1137	541.4	201.9	31.4	119.3	78.1	193.9	75.8	118.1	59.7	116.9	186.6	75.1	58.9	49.7	72.5
LLC1-4	1145	620.8	263.6	49.5	174.1	142.4	238.4	80.5	157.9	73.6	168.2	257.4	85.7	101	89.4	188
LLC1-4	1155	603.7	338.6	57.2	251.9	187.1	254.4	91.4	163.0	85.7	201	324	112.7	105.4	110.6	111.7
LLC1-3	1165	745.9	316.5	55.3	220.6	110.3	252.8	73.8	179.0	93.8	182.8	328.6	75.3	80.2	63.5	203.9
LLC1-3	1175	526.3	258.2	51.6	191.4	139.3	239.3	77.5	161.8	80.5	197.8	309.8	94.8	87.8	69.1	160
LLC1-5	1160	596	324.7	59.8	205.9	196	297.6	118.8	178.8	85.7	201	320.3	133.5	130	92.8	112.7
LLC1-5	1170	951	434	56	244.2	112.9	347.5	93.7	253.8	114.3	220.4	400.2	81.4	108.3	100.3	126.3
LLC1-3	1180	705	342.6	52.5	216	93.2	292.2	86.7	205.5	98.1	196	274.3	82.7	119.9	81.6	88.1
LLC1-5	1190	563.9	266.1	53.5	167.5	143.5	259.4	84.6	174.8	89.2	199.7	253.9	96.7	74.5	78.8	219.2
LLC1-5	1205	456	163.3	25	64.8	87.5	163.3	37.9	125.4	63.3	108.7	147.4	32.8	29.5	37.7	78.8
LLC1-3	1210	678.7	322.9	56.5	196.2	114.4	313.6	85.2	228.4	102.6	202.3	293.1	75.5	92.2	98.2	370.9
LLC1-5	1215	717.5	299.2	53	200.5	121	330.6	93.4	237.2	98.2	203.9	263	80.3	105.1	68.2	354.6
LLC1-5	1220	631.6	301	56.3	218.5	107.4	298.5	82.3	216.2	95.2	203.7	306.5	77.5	90.2	70.4	437.2
LLC1-5	1225	481.1	195.8	47.8	119	125	222.6	142.2	80.4	45.8	92.5	66.4	163.6	87.3	50.6	143.3
LLC1-5	1230	347.9	114.6	57.3	125.1	138.8	151	100.3	50.7	48.2	58.4	58.4	115.4	60.6	56.9	175.2
LLC1-5	1235	330.5	121.8	54	94.1	146.9	162.9	97.2	65.7	127	82.6	45	122.2	66.4	65.6	93.2
LLC1-3	1240	570.4	258.4	48	160.9	73.6	276.7	68.8	207.9	94.7	172.1	383.1	57	94.5	52.5	79.2
LLC1-5	1245	1098	486.8	74.1	274.9	137.9	438.2	94.7	343.5	138.4	251.4	195.6	69.3	104.9	78.5	86.7
LLC1-5	1255	1137.9	449.5	61.4	253.6	131.3	364.8	94.8	270.0	120.4	218.8	235.6	76.8	134.3	54.1	400.4
LLC1-5	1260	412	145.5	25	21.8	158	207.2	129.3	77.9	33	90.3	50	149.8	69.4	45.5	235.8
LLC1-5	1265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LLC1-5	1270	456.9	167	51.7	78.2	210.8	273.3	182.0	91.3	27.9	90	39.6	179.3	71.6	56.8	45.5
LLC1-3	1275	571.5	316.7	37.9	121.8	535.1	500	398.0	102.0	39.4	81	71.2	316.1	105.7	72.8	74.1
LLC1-5	1280	604.2	283.9	43.2	148.7	413.9	434.9	290.2	144.7	42	144.8	61.7	290.3	105.3	98	132.9
LLC1-5	1285	815.8	417.4	65.5	305.8	96.2	321.7	118.2	203.5	104.9	258.8	891.4	150.4	138.4	96.7	69.2
LLC1-3	1290	779	393.9	64.7	302	104.5	375.7	136.0	239.7	112.6	238.6	968.5	146.7	184.2	122.8	51.7
LLC1-5	1295	1415.4	636.7	102.8	448.9	118.3	460.7	174.8	285.9	147.3	290.9	987.2	177.9	208.9	105	58.3

Annexe 30 : Description des zones minéralogiques de la fraction argileuse et des minéraux en grains 2-16 μm des forages LLC 1-3/4 et 5 du Marais du Col-des-Roches (Neuchâtel ; Suisse)

1.2.4. La fraction minérale argileuse 2-16 μm des forages LLC1-3/4 et 5

La figure 2.44 montre que la zonation minéralogique de la fraction 2-16 μm est quasiment identique à celle de la fraction < 2 μm . La paragonite ne figure pas parmi les argiles minérales et l'amphibole n'est pas identifiée parmi les minéraux en grains. Les intensités brutes (annexe n° 18) de l'albite sont très inférieures à celles qui ont été relevées dans le forage LLC1.

Les intensités brutes des micas sont plus élevées ; celles de la chlorite et de la kaolinite sont comparables. Les minéraux en grains ont des intensités brutes légèrement supérieures à celles de la fraction < 2 μm . Les zones différentes seront détaillées ci-dessous. La zonation utilisée est : zone F16 suivi du numéro de la zone.

- zone F16-1 (-13, -12.80 m) à micas dominants

Les intensités brutes du quartz (800 CPS), des feldspaths potassiques (200 CPS) et calcosodiques (120 CPS) sont très élevées dans cette zone et dépassent celles des argiles. Les valeurs des intensités des micas chutent à 400 CPS.

- zone F16-2 (-12.80, -12.70 m)

Un pic d'intensité de 500 CPS (soit environ 15 %) pour la chlorite et un autre de 400

CPS (10-15 %) pour la kaolinite sont caractéristiques de cette zone. Les valeurs du quartz chutent fortement (elles passent de 800 à 50 CPS).

- zone F16-3 (-12.70, -12.60 m)

Les intensités des minéraux diminuent faiblement dans cette partie du forage ; la pyrite, à l'inverse, croît.

- zone F16-4 (-12.60, -12.40 m)

Une hausse des intensités des micas à 1000 CPS caractérise cette zone. Celles du quartz, des feldspaths, de l'albite et de la pyrite sont plus fortes que dans la zone F16-3.

- zone F16-6 (-12.20, -12.00 m)

Cette zone est marquée par une augmentation des intensités brutes des minéraux en grains (pyrite, albite et quartz) et par la hausse des micas.

- zone F16-8 (11.00, 10.30 m) homogènes

Cette zone est caractérisée par des intensités brutes de la pyrite qui dépassent celles des micas et de la chlorite qui sont cependant plus élevées que dans la zone F16 - 7.

Annexe 31 : Tableau des intensités brutes en CPS (Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction minérale argileuse < 2 µm glycolée des niveaux oeningien moyen du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N°	profondeur en cm	Interstratifiés	M 001	M 002	M 004	M 005	CHL 001	K 001/ CHL	K 001 calculé	K 002	CHL 002 calculé	CHL 003	CHL 004	QUARTZ
1	10	1204.7	294.6	95	23.5	120.2	125.5	81.1	557.1	664.9	253.8826325	130.0	303	82
2	100	1984.4	334.5	165.3	105.2	77.9	178.9	1202.6	871.7	1064.1	330.9382195	24.0	404	61.7
3	160	1468	207.9	201.8	36.2	67.1	70	488.7	341.7	495.2	146.982632	21.0	213	96.9
4	280	2291.4	347.7	160.6	31.4	60.6	40.3	636	509.1	477.6	126.8588669	20.0	119	37.2
5	320	1709	274	97.3	24	46.6	41.1	358.5	260.5	249.8	98.01919721	13.0	94	57.3
6	410	2071.4	369.4	390.4	30.5	109.8	296	1398.3	1257.7	1342.1	140.5703371	50.0	150	36.8
7	560	1848.2	410.1	385	44	133.2	333	1376.8	1102.5	1342.6	274.2760348	41.7	334	47

Annexe 32 : Tableau des intensités brutes en CPS (Coups Par Seconde) des minéraux de la fraction argileuse < 2 µm glycolée des niveaux oeningien moyen du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE ; CH)

N°	Profondeur en cm	M 001	M 002	M 004	M 005	CHL 001	K 001/ CHL 002	K 001 calculé	K 002	CHL 002 calculé	CHL 003	CHL 004	QUARTZ	Feldspath s-K
1	10	278.8	170.6	39.9	175.3	24.5	60.7	35.7	77	25.0	22	54	170.3	55.5
2	100	265	166	48.2	167.8	24	85.3	52.2	80.4	33.1	20	51	246.1	77.5
3	160	142	57.3	46.1	39.8	146	122.7	61.4	60	61.4	43	60	207.5	45.1
4	280	245	103.7	29.9	56.1	163	183.3	127.3	133.6	56.0	46	58.8	91.2	43.2
5	320	338.5	150.7	37.2	121.6	106	124.1	67.2	104	56.9	25	88	150.4	31
6	410	302.4	114.1	28.6	89	128	455.7	236.2	141	219.5	36	131	63.3	57.8
7	560	247.3	84.7	23.7	60.7	129	383.7	215.7	217	168.0	49	169	58	31.7

Annexe 33 : Tableau des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) des minéraux des sédiments
"Roche Totale" du sondage 2 du lac d'ILAY, 778 m (Jura, France)

N° échantillon	Profondeur (cm)	Phyllosilicates	Quartz	Feldspaths-K	Calcaire	Aragonite
1	1	0	5062	0	117616	2520
2	3	0	7402	0	75290	2220
3	5	0	8154	0	144516	2580
4	7	0	1860	0	124874	900
5	9	0	2340	0	120530	1080
6	11	0	2880	0	93303	840
7	13	0	0	0	151521	0
8	15	0	0	0	172224	900
9	19	0	510	0	215635	2123
10	21	0	690	0	219409	1650
11	23	0	0	0	216589	1410
12	25	0	0	0	215897	2470
13	27	0	600	0	222790	1470
14	29	0	0	0	221785	600
15	31	0	0	0	221049	1400
16	33	0	0	0	212981	1440
17	35	0	0	0	222704	0
18	37	0	0	0	220378	2010
19	39	0	2453	0	164171	3914
20	41	938	5553	1290	117984	5826
21	43	0	2970	0	137125	3062
22	45	0	2499	0	186638	2958
23	47	0	3056	0	221538	2117
24	51	0	0	0	225446	2055
25	53	0	0	0	181843	2404
26	55	0	0	0	210376	2322
27	57	0	0	0	212572	2212
28	59	0	0	0	225109	2890
29	61	0	2461	0	213285	4456
30	63	0	0	0	234780	1620
31	65	0	0	0	207194	1560
32	67	0	1500	0	223084	2060
33	71	0	0	0	225944	2280
34	73	0	0	0	215620	1320
35	75	0	0	0	222719	2403
36	77	0	0	0	223107	3255
37	79	0	0	0	209295	2558
38	81	0	0	0	202196	2235
39	83	0	0	0	221176	2889
40	85	0	0	0	205560	4367
41	87	0	0	0	193753	4030
42	89	0	0	0	220430	4136
43	91	0	1440	0	218866	3639
44	93	0	1620	2106	218303	5073
45	95	0	0	2027	208256	4750
46	97	0	0	0	215467	3461
47	99	0	0	0	209654	2520
48	101	0	0	0	219537	4823
49	103	0	0	0	226384	3182
50	105	0	0	2102	222267	4653
51	107	0	0	0	228578	1800
52	109	0	1440	0	227249	2040
53	111	0	0	0	222641	3885
54	113	0	0	0	226804	2160
55	115	0	0	0	230145	1560
56	117	0	0	0	228063	1380
57	119	0	0	0	221514	2160
58	121	0	0	0	213321	2340
59	123	0	1380	0	231640	1200
60	125	0	2700	0	225325	3351
61	127	0	0	0	223386	2890
62	129	0	0	0	225245	2948
63	131	0	0	0	222959	2253
64	133	0	0	0	237510	0
65	135	0	0	0	228082	2100
66	137	0	0	0	230905	2662
67	139	0	0	0	227206	1800
68	141	0	2220	0	238150	1380
69	143	0	0	0	228274	2280
70	145	0	0	0	232963	1940
71	147	0	0	0	220745	1680
72	149	0	0	0	230931	1500
73	151	0	0	0	244512	0
74	153	0	0	0	218220	4282
75	155	0	0	0	219796	5382
76	157	0	0	0	233740	1980
77	159	0	0	0	212080	2307
78	161	0	0	0	223695	1860
79	163	0	0	0	233933	1560
80	165	0	0	0	216740	3570
81	167	0	0	0	228587	2486
82	169	0	0	0	226185	1140

Annexe 34

Annexe 34 : Tableau des pourcentages des minéraux dans le sédiment "Roche Totale" du sondage 2 du lac d'ILAY , 778 m (Jura, France)

N° échantillon	Profondeur (cm)	Calcite	Aragonite	Quartz	Feldspaths-K	Phyllosilicates	Indosés
1	1	38.92	3.19	0.99	0	0	56.9
2	3	23.02	2.6	1.34	0	0	73.05
3	5	76.82	4.44	2.2	0	0	16.54
4	7	97.28	1.67	0.51	0	0	0.53
5	9	81.71	3.38	0	0	0	14.91
6	11	87.9	3.09	0	0	0	9.01
7	13	84.92	2.68	0.37	0	0	12.03
8	15	93.11	3.43	0	0	0	3.45
9	19	85.65	3.2	0.13	0	0	11.04
10	21	87.57	2.52	0.16	0	0	9.76
11	23	86.04	2.14	0	0	0	11.83
12	25	85.81	3.81	0	0	0	10.39
13	27	84.97	2.19	0.14	0	0	12.71
14	29	79.06	0.89	0	0	0	20.05
15	31	81.75	2.04	0	0	0	16.21
16	33	74.88	2.04	0	0	0	23.09
17	35	79.75	0	0	0	0	20.26
18	37	79.1	2.85	0	0	0	18.06
19	39	53.04	5.08	0.5	0	0	41.39
20	41	39.13	8.52	0.97	1.92	4.9	44.57
21	43	58.85	5.42	0.81	0.76	0	34.17
22	45	62.38	4.01	0.52	0	0	33.09
23	47	78.96	3.05	0.57	0	0	17.32
24	51	81.66	3.03	0	0	0	15.31
25	53	67.98	3.3	0	0	0	28.72
26	55	81	3.43	0	0	0	15.58
27	57	85.47	3.33	0	0	0	11.2
28	59	90.2	4.43	0	0	0	5.37
29	61	83.69	6.69	0.57	0	0	9.04
30	63	95.74	2.53	0	0	0	1.73
31	65	79.33	2.29	0	0	0	18.39
32	67	88.66	3.13	0.35	0	0	7.86
33	71	90.49	3.5	0	0	0	6.01
34	73	84.04	1.97	0	0	0	13.99
35	75	88.59	3.66	0	0	0	7.75
36	77	89.12	4.98	0	0	0	5.9
37	79	80.83	3.78	0	0	0	15.39
38	81	76.78	3.25	0	0	0	19.97
39	83	87.83	4.39	0	0	0	7.77
40	85	79.32	6.45	0	0	0	14.22
41	87	72.78	5.8	0	0	0	21.42
42	89	87.82	6.31	0	0	0	5.87
43	91	87.65	5.56	0.34	0	0	6.45
44	93	87.86	7.82	0.39	1.65	0	2.28
45	95	81.88	7.15	0	1.56	0	9.41
46	97	85.39	5.26	0	0	0	9.14
47	99	81.89	3.77	0	0	0	14.34
48	101	88.3	7.44	0	0	0	4.05
49	103	92.1	4.96	0	0	0	2.94
50	105	90.15	7.23	0	1.66	0	0.96
51	107	92.97	2.8	0	0	0	4.23
52	109	92.2	3.17	0.35	0	0	4.29
53	111	90.05	6.02	0	0	0	3.93
54	113	91.99	3.35	0	0	0	4.65
55	115	91.72	2.38	0	0	0	5.89
56	117	90.4	2.09	0	0	0	7.51
57	119	86.77	3.24	0	0	0	9.99
58	121	82.11	3.45	0	0	0	14.44
59	123	92.48	1.83	0.33	0	0	5.36
60	125	89.39	5.09	0.63	0	0	4.89
61	127	88.12	4.37	0	0	0	7.51
62	129	89.25	4.47	0	0	0	6.28
63	131	87.65	3.39	0	0	0	8.96
64	133	95.73	0	0	0	0	4.27
65	135	90.66	3.2	0	0	0	6.14
66	137	92.58	4.09	0	0	0	3.34
67	139	85.21	2.77	0	0	0	12.01
68	141	91.28	2.17	0.54	0	0	6.01
69	143	85.98	3.53	0	0	0	10.49
70	145	88.52	3.03	0	0	0	8.45
71	147	81.61	2.55	0	0	0	15.83
72	149	87.21	2.33	0	0	0	10.46
73	151	94.6	0	0	0	0	5.4
74	153	81.13	6.54	0	0	0	12.33
75	155	82.36	8.29	0	0	0	9.35
76	157	88.98	3.1	0	0	0	7.92
77	159	77.19	3.45	0	0	0	19.36
78	161	83.29	2.85	0	0	0	13.87
79	163	88.94	2.44	0	0	0	8.62
80	165	80.08	5.42	0	0	0	14.49
81	167	86.23	3.85	0	0	0	9.92
82	169	84.42	1.75	0	0	0	13.83

Annexe 35 : Description des zones minéralogiques du sédiment total du forage d'Ilay (Jura, France)

2.1.1.1. Zone RT1 (- 170, - 52 cm)

Cette zone minéralogique est caractérisée par une quantité constante de calcite voisine de 85 % (pour des intensités brutes de l'ordre de 2.10^5 CPM) et d'un taux variable d'aragonite qui permet de distinguer 3 sous-zones.

- sous-zone RT1a (- 170, - 152 cm)

On observe dans cette sous-zone un taux variable, mais croissant, d'aragonite. Les valeurs des intensités brutes passent de 1500 à plus 5000 CPM ce qui correspond à des pourcentages allant de 1.5 à 7.5 %.

- sous-zone RT1b (- 152, - 95 cm)

Cette sous-zone se caractérise par des taux d'aragonite variables qui tendent à croître du début vers la fin de la sous-zone. Les taux relevés s'échelonnent entre 0 et 6 % du sédiment total. Des occurrences de quartz inférieures à 0.5 % et une de feldspaths potassiques (environ 2 %) sont observées dans cette sous-zone. Le taux des indosés varie peu mais décroît légèrement.

- sous-zone RT1c (- 95, - 52 cm)

A l'inverse de la sous-zone précédente, celle-ci se différencie par la tendance décroissante des taux et des intensités brutes de l'aragonite. Les taux passent

de 6 à 2.5 %. Quelques occurrences de quartz et de feldspaths sont encore observées. Le taux des indosés varie beaucoup plus mais ne laisse apparaître aucune tendance significative. A la fin de cette sous-zone on remarque une diminution régulière du taux de calcite.

2.1.1.2. Zone RT2 (- 52, - 35 cm)

Cette zone minéralogique se différencie par la diminution du taux de calcite ; il passe de 80 à seulement 30 % du sédiment. On observe également une hausse du taux de quartz (1 %) et d'aragonite (10 %). Parallèlement, une occurrence de phyllosilicates et de feldspaths est relevée. Dans cette sous-zone, les pourcentages d'indosés atteignent 40 %.

2.1.1.3. Zone RT3 (- 35, - 7 cm)

Elle se caractérise par des pourcentages de calcite qui sont à nouveau supérieurs à 80 % et des taux d'aragonite qui augmentent de la base au sommet de la zone. Comme dans les sous-zones RT 1 b et c on observe la présence sporadique de quartz.

2.1.1.4. Zone RT4 (- 7, 0 cm)

Une hausse rapide du taux de quartz (de 0.5 à 2.5 %) associée à une diminution importante du taux de calcite (de 98 % à 20 %) permet d'individualiser la zone RT4.

Annexe 40 : Description des zones minéralogiques des fractions argileuses du forage d'Ilay (Jura, France)

- zone FT-1 (- 170, - 135 cm)

Les micas présentent les intensités brutes les plus élevées 100-150 CPS. Les intensités brutes de la chlorite et de la kaolinite arrivent en seconde position (50-60 CPS). L'albite (30 CPS) y est rencontrée de manière continue et disparaît du sommet de la zone.

- Zone FT-2 (- 135, - 105 cm)

Cette zone est caractérisée par les variations des intensités brutes de la chlorite et de la kaolinite, en particulier entre 125 et 130 cm de profondeur, parallèlement à celles des minéraux en grains.

- Zone FT-3 (- 105, - 72 cm)

Cette zone minéralogique est identifiée par une diminution conjointe de tous les minéraux de la fraction à l'exception de celles du quartz.

- Zone FT-4 (- 72, - 60 cm)

Les intensités brutes des argiles minérales sont en hausse alors que celles du quartz restent stables.

- Zone FT-5 (- 60, - 32 cm)

On observe de nouveau dans cette zone une diminution de toutes les intensités brutes, celles-ci montrent une tendance à la hausse en fin de zone.

- Zone FT-6 (- 32, - 5 cm)

Les valeurs des intensités des micas montrent une hausse relativement importante car elles atteignent 150 CPS. Les intensités des autres minéraux montrent également une hausse mais nettement moins marquée. Les intensités des argiles diminuent au sommet de la zone.

Annexe 36-37

Annexe 36 : Tableau des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) des minéraux des sédiments "Roche Totale" du sondage 2 du lac d'ILAY, 778 m (Jura, France), Carotte A

Profondeur (cm)	Phyllosilicates	Quartz	Feldspaths-K	Calcite	Aragonite
1	0	5062	0	117616	2520
3	0	7402	0	75290	2220
5	0	8154	0	144516	2580
7	0	1860	0	124874	900
9	0	2340	0	120530	1080
11	0	2880	0	93303	840
13	0	0	0	151521	0
15	0	0	0	172224	900
17	0	1020	0	220570	1440
19	0	0	0	215261	1440
21	0	0	0	222914	1320
23	0	0	0	214131	3680
25	0	0	0	236230	1080
27	0	0	0	225411	0
29	0	0	0	218995	1360
31	0	0	0	214873	1440
33	0	0	0	219940	0
35	0	0	0	218180	2700
37	0	2280	0	171109	4558
39	1876	7116	0	103405	5901
41	0	2340	0	114142	3101
43	0	1800	0	203888	2237
45	0	1680	0	255859	2225
47	0	0	0	232577	1380
49	0	0	0	228443	1860
51	0	0	0	208270	2188

Annexe 37 : Tableau des pourcentages approximatifs des minéraux dans le sédiment "Roche Totale" du sondage 2 du lac d'ILAY, 778 m (Jura, France), Carotte A

Profondeur (cm)	Calcite	Aragonite	Quartz	Fsp-K	Phyllosilicates	Indosés
1	38.92	3.19	0.99	0	0	56.9
3	23.02	2.6	1.34	0	0	73.05
5	76.82	4.44	2.2	0	0	16.54
7	97.28	1.67	0.51	0	0	0.53
9	81.71	3.38	0	0	0	14.91
11	87.9	3.09	0	0	0	9.01
13	84.92	2.68	0.37	0	0	12.03
15	93.11	3.43	0	0	0	3.45
17	90.36	2.26	0.25	0	0	7.14
19	87.11	2.23	0	0	0	10.66
21	91.8	2.08	0	0	0	6.12
23	87.21	5.74	0	0	0	7.05
25	78.92	1.53	0	0	0	19.55
27	73.45	0	0	0	0	26.55
29	70.88	1.86	0	0	0	27.25
31	69.04	1.96	0	0	0	29
33	70.93	0	0	0	0	29.07
35	70.9	3.71	0	0	0	25.39
37	51.53	5.81	0.45	0	0	42.21
39	33.8	9.66	1.15	2.15	9.8	43.44
41	61.86	6.8	0.88	1.52	0	28.95
43	64.39	2.99	0.37	0	0	32.25
45	89.2	3.28	0.38	0	0	7.13
47	77.24	1.94	0	0	0	20.81
49	90.98	2.84	0	0	0	6.18
51	79.39	3.19	0	0	0	17.42

Annexe 38 : Tableau des intensités brutes en CPM (Coups Par Minute) des minéraux des sédiments
"Roche Totale" du sondage 2 du lac d'ILAY, 778 m (Jura, France), Carotte B

Profondeur (cm)	Phyllosilicates	Quartz	Feldspaths- K	Calcite	Aragonite
21	0	0	0	210699	2805
23	0	1380	0	223557	1860
25	0	0	0	210263	1500
27	0	0	0	217662	1260
29	0	1200	0	228550	1860
31	0	0	0	218159	1200
33	0	0	0	243103	1440
35	0	0	0	211088	1440
37	0	0	0	225477	0
39	0	0	0	222575	1320
41	0	2626	0	157112	3269
43	0	3989	2580	132563	5750
45	0	3600	0	160108	3022
47	0	3198	0	169387	3678
49	0	4431	0	187216	2008
51	0	0	0	218315	2729
53	0	0	0	135243	2948
55	0	0	0	212482	2456
57	0	0	0	217572	2212
59	0	0	0	225109	2890
61	0	2461	0	213285	4456
63	0	0	0	234780	1620
65	0	0	0	207194	1560
67	0	1500	0	223084	2060
71	0	0	0	225944	2280
75	0	0	0	215620	1320
75	0	0	0	222719	2403
77	0	0	0	223107	3255
79	0	0	0	209295	2558
81	0	0	0	202196	2235
83	0	0	0	221176	2889
85	0	0	0	205560	4367
87	0	0	0	193733	4030
89	0	0	0	220430	4136
91	0	1440	0	218866	3629
93	0	1620	2106	218303	5073
95	0	0	2027	208256	4750
97	0	0	0	215467	3461
99	0	0	0	209654	2520
101	0	0	0	219537	4823
103	0	0	0	226384	3182
105	0	0	2102	222267	4653
107	0	0	0	228578	1800
109	0	1440	0	227249	2040
111	0	0	0	222641	3885
113	0	0	0	226804	2160
115	0	0	0	230145	1560
117	0	0	0	228063	1380
119	0	0	0	221514	2160
121	0	0	0	213321	2340
123	0	1380	0	231640	1200
125	0	2700	0	225325	5351
127	0	0	0	223386	2890
129	0	0	0	225245	2948
131	0	0	0	222959	2253
133	0	0	0	237510	0
135	0	0	0	228082	2100
137	0	0	0	230905	2662
139	0	0	0	227206	1800
141	0	2220	0	238150	1380
143	0	0	0	228274	2280
145	0	0	0	232963	1940
147	0	0	0	220745	1680
149	0	0	0	230931	1500
151	0	0	0	244512	0
153	0	0	0	218220	4282
155	0	0	0	219796	5382
157	0	0	0	233740	1980
159	0	0	0	212080	2307
161	0	0	0	223695	1860
163	0	0	0	233933	1560
165	0	0	0	216740	3570
167	0	0	0	228587	2486
169	0	0	0	226185	1140

Annexe 39

Annexe 39 : Tableau des pourcentages des minéraux des sédiments "Roche Totale" du sondage 2 du lac d'ILAY , 778 m (Jura, France), Carotte B

Profondeur (cm)	Calcite	Aragonite	Quartz	Feldspaths-K	Phyllosilicates	Indosés
21	80.94	4.13	0	0	0	14.93
23	88.02	2.8	0.32	0	0	8.85
25	80.28	2.19	0	0	0	17.53
27	84.4	1.87	0	0	0	13.73
29	91.02	2.84	0.28	0	0	5.86
31	84.67	1.78	0	0	0	13.55
33	92.62	2.21	0	0	0	5.17
35	80.72	2.11	0	0	0	17.17
37	88.56	0	0	0	0	11.44
39	87.29	1.98	0	0	0	10.73
41	54.55	4.35	0.54	0	0	40.56
43	44.45	7.38	0.79	1.69	0	45.69
45	55.84	4.04	0.74	0	0	39.38
47	60.37	5.02	0.67	0	0	33.93
49	68.71	2.82	0.96	0	0	27.51
51	86.08	4.12	0	0	0	9.8
53	44.98	3.75	0	0	0	51.26
55	82.61	3.66	0	0	0	13.74
57	85.47	3.33	0	0	0	11.2
59	90.2	4.43	0	0	0	5.37
61	83.69	6.69	0.57	0	0	9.04
63	95.74	2.53	0	0	0	1.73
65	79.33	2.29	0	0	0	18.39
67	88.66	3.13	0.35	0	0	7.86
71	90.49	3.5	0	0	0	6.01
73	84.04	1.97	0	0	0	13.99
75	88.59	3.66	0	0	0	7.75
77	89.12	4.98	0	0	0	5.9
79	80.83	3.78	0	0	0	15.39
81	76.78	3.25	0	0	0	19.97
83	87.83	4.39	0	0	0	7.77
85	79.32	6.45	0	0	0	14.22
87	72.78	5.8	0	0	0	21.42
89	87.82	6.31	0	0	0	5.87
91	87.65	5.56	0.34	0	0	6.45
93	87.86	7.82	0.39	1.65	0	2.28
95	81.88	7.15	0	1.56	0	9.41
97	85.59	5.26	0	0	0	9.14
99	81.89	3.77	0	0	0	14.34
101	88.5	7.44	0	0	0	4.05
103	92.1	4.96	0	0	0	2.94
105	90.15	7.23	0	1.66	0	0.96
107	92.97	2.8	0	0	0	4.23
109	92.2	3.17	0.35	0	0	4.29
111	90.05	6.02	0	0	0	3.93
113	91.99	3.35	0	0	0	4.65
115	91.72	2.38	0	0	0	5.89
117	90.4	2.09	0	0	0	7.51
119	86.77	3.24	0	0	0	9.99
121	82.11	3.45	0	0	0	14.44
123	92.48	1.83	0.33	0	0	5.36
125	89.39	5.09	0.63	0	0	4.89
127	88.12	4.37	0	0	0	7.51
129	89.25	4.47	0	0	0	6.28
131	87.65	3.39	0	0	0	8.96
133	95.73	0	0	0	0	4.27
135	90.66	3.2	0	0	0	6.14
137	92.58	4.09	0	0	0	3.34
139	85.21	2.77	0	0	0	12.01
141	91.28	2.17	0.54	0	0	6.01
143	85.98	3.53	0	0	0	10.49
145	88.52	3.03	0	0	0	8.45
147	81.61	2.55	0	0	0	15.83
149	87.21	2.33	0	0	0	10.46
151	94.6	0	0	0	0	5.4
153	81.13	6.54	0	0	0	12.33
155	82.36	8.29	0	0	0	9.35
157	88.98	3.1	0	0	0	7.92
159	77.19	3.45	0	0	0	19.36
161	83.29	2.85	0	0	0	13.87
163	88.94	2.44	0	0	0	8.62
165	80.08	5.42	0	0	0	14.49
167	86.23	3.85	0	0	0	9.92
169	84.42	1.75	0	0	0	13.83

Annexe 41 : Tableau des intensités brutes en CPS (Coups Par Seconde) de la fraction minérale argileuse totale glycolée des sédiments "Roche Totale" du sondage 2 du lac d'ILAY, 778 m (Jura, France)

N°	Profondeur en cm	M 001	M 002	CHL 001	K 001 / CHL 002	K 001 calculé	K 002	CHL 002 calculé	CHL 003	CHL 004	QUARTZ	F-K	ALBITE
1	8	71.8	37.7	37.4	40	15.62	28	24.38	23.4	43.7	54.8	38.8	0
2	14	121.1	66.3	57.3	97.5	49.32	56.3	48.18	55	55	63.8	0	35.2
3	20	135.2	44	40.5	88.3	32.52	35.5	55.78	43	60.9	41	54.8	0
4	22	138.9	53.8	50.1	84.4	37.74	42.7	46.66	41.7	52.8	53.7	0	0
5	24	110.4	41.7	46.3	58.2	30.40	42	27.80	39	38.4	41.3	0	0
6	26	157.8	59.8	57.4	104.3	40.53	34	63.77	35.5	53.5	56.2	0	0
7	28	83.5	53	57.1	85.1	45.57	48.3	39.53	36	41.9	58.5	0	0
8	30	121.1	52.6	62.1	86.8	39.52	51.4	47.28	40	61.5	57.9	0	0
9	32	73.7	50	34.6	46.3	22.16	45	24.14	35	49	24	0	0
10	34	58.3	25	37.8	50.6	25.63	39	24.97	36	38	48	0	0
11	36	36	32	31	35.7	16.58	26	19.13	34	30	0	0	0
12	38	80.4	40.9	38.8	45.8	18.15	20.8	27.65	26.2	31.7	26.9	36.8	0
13	42	69.6	28	51.7	59.5	30.78	52.5	28.72	50	49	47.6	0	0
14	46	56.2	47	38.2	56.3	30.05	51.5	26.25	30	45	42.5	0	0
24	52	38.3	38	39.4	49.3	26.27	50.2	23.03	52	44	35.2	0	50
15	56	36.9	36.3	35.9	41.9	23.23	51	18.67	36.4	41	38.9	0	0
16	60	75	53.7	58	84.7	45.55	60.5	39.15	40	52	59.7	0	0
17	70	109.5	66.8	65.5	130.3	65.60	72.8	64.70	39	71.8	61.5	0	0
25	80	83.4	53	44.7	62.3	27.61	39.8	34.69	21	50	66	37.4	35.9
26	90	77.1	55.4	36.3	65	40.30	40.8	24.70	45	25	51.4	0	0
27	100	49.7	39	42.4	68.3	36.26	43.9	32.04	39	38.8	39	48.9	0
28	110	104.1	61.9	93.1	132.1	92.65	115.8	39.45	38	49.3	85	0	0
29	116	94.4	48.6	54.1	89.5	55.87	80.4	33.63	62	48.4	70.2	0	39.8
30	118	86.9	34	74.7	89.6	50.50	56.3	39.10	36	43.6	64.2	0	0
31	120	92.3	43	61	87.9	39.00	43.3	48.90	40	54.3	57.6	0	0
32	122	73.1	39.8	50.8	53.5	28.50	43.2	25.00	26	37.9	28	26.3	35.4
33	124	90.2	50.8	81.1	116.2	71.79	78.9	44.41	43.7	48.8	83.2	40.9	50.4
34	126	107.4	48.4	83.3	109.2	61.10	71.9	48.10	44.7	56.6	79.2	26.3	40.2
35	128	100.2	55.3	98.6	129.6	77.78	80.6	51.82	59	53.7	59	0	0
36	130	87.7	35.6	56.6	69.5	45.87	66	23.63	36	34	38.2	0	0
37	132	94.1	39.2	66.7	97.6	59.78	58.8	37.82	36	37.2	47	0	0
38	134	74	39	44.9	38	20.68	41.8	17.32	40	35	31	22.1	0
39	140	91.3	49	55	96	58.13	84.9	37.87	46.7	55.3	64.9	0	33.8
40	150	135.2	61.6	73.3	131.8	78.85	76.7	52.95	42	51.5	119.1	48.2	34.4
41	168	90.4	45.5	64.5	89.1	56.22	63.6	32.88	36.4	37.2	69.8	29.6	37.7

Annexe 42

Annexe 42 : Tableau des résultats des analyses géochimiques des sédiments du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH)

N°	Profondeur en cm	Température en °C	Porosité	Carbone total	Azote total	Hydrogène total	Résidu fixe	Carbone organique	Azote organique	Hydrogène organique	Céleri	Potassium	Soufre	Magnésium	Sodium	Manganèse	Pb	Aluminium	Orthophosphates	Silice
1	109	71.28	70.35	20.309	1.167	2.721	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	125	57.62	62	14.24	0.429	1.138	29.322	5.88	0.433	0.837	64.134	0.016	0.089	0.229	0.059	0.008	0.177	0.161	0.069	0.535
3	143	68.43	78.47	16.019	0.979	2.758	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	178	60.19	74.83	14.227	0.597	1.843	55.466	8.584	0.56	1.39	33.184	0.041	0.038	0.507	0.06	0.01	0.443	0.356	0.098	1.411
5	197	63.83	80.63	15.489	0.699	2.097	61.447	10.787	0.698	1.65	30.737	0.063	0.048	0.495	0.061	0.009	0.695	0.35	0.11	1.883
6	218	59.76	72.5	16.034	0.4	1.065	25.947	4.946	0.394	0.792	58.196	0.018	0.087	0.409	0.06	0.011	0.795	0.17	0.079	0.726
7	224	63.05	77.77	15.295	0.628	1.679	47.728	8.884	0.626	1.388	40.028	0.031	0.063	0.518	0.059	0.011	0.462	0.295	0.093	1.196
8	237	53.33	71.93	12.405	0.29	0.827	28.832	3.78	0.271	0.642	57.617	0.019	0.082	0.337	0.062	0.011	0.798	0.199	0.104	0.843
9	262	54.76	68.63	13.313	0.333	0.894	21.367	4.113	0.287	0.664	58.721	0.017	0.087	0.439	0.059	0.012	0.303	0.15	0.101	0.809
10	267	79.86	77.2	35.718	1.838	4.621	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	307	84.37	79.87	36.478	1.693	4.645	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	323	83	86.6	35.166	1.624	4.738	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	349	77.04	83.2	26.973	1.604	4.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	366	75.48	81.52	25.493	1.303	3.909	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	388	78.22	85	24.073	1.301	3.832	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	413	54.95	75.07	13.562	0.372	1.088	33.803	5.334	0.367	0.819	53.82	0.019	0.082	0.447	0.057	0.009	0.777	0.17	0.093	0.841
17	430	58.04	80.1	13.189	0.469	1.296	38.26	6.186	0.418	1.004	49.789	0.02	0.083	0.419	0.059	0.009	0.333	0.174	0.108	0.85
18	449	68.43	83.03	18.877	0.933	2.665	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	478	60.26	78.23	13.006	0.378	1.132	31.568	5.389	0.394	0.901	56.283	0.016	0.085	0.319	0.057	0.01	0.337	0.145	0.103	0.714
20	528	53.33	69.5	13.571	0.338	0.84	24.027	4.278	0.323	0.67	62.04	0.011	0.113	0.378	0.057	0.01	0.209	0.113	0.099	0.582
21	558	54.68	74.37	13.85	0.387	0.997	25.895	4.852	0.373	0.757	60.318	0.012	0.113	0.528	0.058	0.01	0.206	0.122	0.089	0.529
22	580	53.33	73.32	13.331	0.34	0.832	22.773	3.892	0.311	0.616	63.509	0.015	0.11	0.429	0.063	0.01	0.191	0.12	0.089	0.572
23	600	53.13	76.33	13.1	0.319	0.872	25.433	4.1	0.305	0.686	59.849	0.012	0.108	0.436	0.056	0.012	0.207	0.114	0.093	0.533
24	619	72.95	73.87	24.598	1.378	3.333	67.585	28.324	1.366	0	23.282	0.025	0.049	0.455	0.084	0.011	0.493	0.229	0.109	1.101
25	650	53.4	76	13.564	0.332	0.947	25.852	4.543	0.329	0.72	61.348	0.012	0.094	0.397	0.058	0.01	0.216	0.135	0.079	0.575
26	678	60.84	84.17	15.512	0.524	1.396	34.343	7.369	0.473	1.009	51.536	0.023	0.077	0.368	0.063	0.009	0.268	0.138	0.084	0.759
27	704	58.72	81.03	15.473	0.503	1.361	36.68	7.797	0.494	1.026	50.757	0.019	0.093	0.369	0.058	0.008	0.252	0.148	0.088	0.655
28	736	59.33	78.13	13.739	0.432	1.218	36.198	6.046	0.44	0.921	51.194	0.017	0.081	0.398	0.061	0.01	0.283	0.163	0.102	0.823
29	753	64.45	80.57	20.722	0.813	2.253	51.521	14.865	0.833	0	37.202	0.029	0.061	0.317	0.057	0.007	0.335	0.177	0.072	0.844
30	767	78.1	83.57	38.129	1.615	4.772	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	778	75.37	87.43	27.228	1.629	3.962	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	791	48.64	69.4	16.857	0.352	0.865	18.979	3.077	0.351	0.689	63.684	0.007	0.106	0.34	0.06	0.006	0.142	0.071	0.056	0.283
33	814	56.43	75.43	12.053	0.304	1.179	20.75	7.564	0.516	0.933	63.988	0.007	0.108	0.337	0.059	0.006	0.172	0.093	0.047	0.359
34	844	71.18	84.72	22.699	1.002	2.385	31.426	16.068	0.94	1.95	38.335	0.033	0.061	0.264	0.105	0.005	0.248	0.224	0.071	0.846
35	865	44.38	67.36	13.347	0.187	0.545	12.333	2.584	0.172	0.372	72.714	0.007	0.14	0.525	0.06	0.008	0.126	0.068	0.058	0.298
36	896	41.3	65.53	12.798	0.16	0.504	13.009	2.13	0.162	0.36	72.946	0.009	0.133	0.536	0.06	0.009	0.123	0.072	0.064	0.342
37	926	48.2	70.7	16.894	0.319	0.902	29.9	6.258	0.323	0.728	58.077	0.002	0.119	0.369	0.061	0.006	0	0.005	0.002	0.043
38	957	52.08	69.97	17.009	0.368	1.166	41.576	14.428	0.737	1.667	63.684	0.001	0.073	0.248	0.055	0.005	0.018	0.009	0.004	0.072
39	991	46.73	69.37	14.102	0.272	0.728	39.183	6.782	0.271	0.63	69.767	0.001	0.087	0.228	0.051	0.006	0.019	0.009	0.004	0.046
40	1025	50.27	72.47	14.34	0.203	0.573	38.174	6.939	0.198	0.431	67.222	0.002	0.09	0.244	0.056	0.005	0.013	0.009	0.004	0.02
41	1069	45.19	67.03	12.851	0.0473	0.1934	38.467	9.538	0.72	1.139	64.994	0	0.104	0.388	0.054	0.004	0.006	0.006	0.004	0.016
42	1117	47.16	68.7	12.653	0.0453	0.1358	37.988	3.027	0.065	0.159	75.624	0.003	0.091	0.279	0.056	0.004	0.013	0.006	0.005	0.047
43	1168	46.39	67.73	12.5126	0.0701	0.2238	39.901	7.649	0.599	1.123	71.73	0.001	0.118	0.347	0.053	0.005	0.013	0.008	0.005	0.078
44	1203	59.45	76.3	14.472	0.336	0.914	38.568	7.893	0.342	0.81	75.118	0.003	0.101	0.269	0.061	0.005	0.019	0.008	0.005	0.073
45	1238	64.41	78.8	13.003	0.453	1.221	38.633	7.808	0.467	0	75.601	0.003	0.091	0.348	0.063	0.007	0.018	0.01	0.005	0.068
46	1262	72.72	50.53	13.176	0.046	0.302	11.89	0.249	0.043	0.229	34.705	0.018	0.164	0.53	0.017	0.017	0.191	0.06	0.082	0.369
47	1284	26.43	49.3	10.613	0.036	0.314	16.02	0.54	0.029	0.286	33.928	0.028	0.145	0.691	0.02	0.019	0.233	0.089	0.097	0.327
48	1313	27.77	46.83	11.5037	0.021	0.2149	12.66	1.049	0.071	0.166	32.414	0.02	0.158	1.035	0.053	0.019	0.243	0.056	0.122	0.546
49	1343	23.3	49.63	9.811	0.029	0.317	20.61	0.616	0.025	0.255	29.64	0.035	0.128	0.833	0.024	0.023	0.306	0.058	0.107	0.642
50	1364	25.07	44.03	11.0314	0.0243	0.2653	16.37	0.896	0.023	0.162	33.342	0.025	0.159	0.929	0.028	0.02	0.283	0.078	0.103	0.606
51	1379	24.37	45.53	10.1152	0.0216	0.26	19.41	0.582	0.018	0.227	29.684	0.03	0.142	0.85	0.027	0.022	0.326	0.091	0.105	0.644
52	1393	26.34	49.6	10.5147	0.0225	0.189	18.13	0.537	0.023	0.209	30.087	0.025	0.161	0.858	0.028	0.02	0.283	0.073	0.098	0.533
53	1407	24.28	46.93	9.841	0.023	0.2327	20.29	0.589	0.021	0.281	29.222	0.035	0.129	0.965	0.025	0.024	0.343	0.103	0.104	0.625
54	1427	28.42	50.5	10.616	0.038	0.385	20.72	1.324	0.044	0.281	29.229	0.027	0.149	0.843	0.026	0.023	0.333	0.091	0.092	0.617
55	1449	21.28	41.2	11.208	0.019	0.25	13.13	1.109	0.026	0.203	30.574	0.02	0.154	1.118	0.03	0.022	0.316	0.052	0.105	0.422
56	1462	25.46	49.73	9.748	0.023	0.347	20.95	0.579	0.023	0.289	28.731	0.044	0.13	1.075	0.027	0.026	0.457	0.138	0.103	0.903
57	1469	23.8	38.23	11.4767	0.0181	0.1841	11.35	0.883	0.017	0.143	32.461	0.022	0.162	1.101	0.032	0.022	0.32	0.061	0.105	0.806
58	1479	26.08	48.9	10.1306	0.0307	0.2809	21.39	0.733	0.03	0.275	29.097	0.033	0.142	0.942	0.025	0.023	0.331	0.104	0.094	0.684
59	1489	23.5	33.1	12.1749	0.0188	0.2166	8.16	1.038	0.023	0.156	32.37	0.018	0.171	1.271	0.033	0.021	0.3	0.042	0.103	0.489
60	1521	27.32	57	10.3833	0.0203	0.2899	18.88	0.673	0.025	0.209	29.346	0.028	0.182	1.112	0.03	0.022	0.352	0.085	0.089	0.637
61	1556	26.07	57	10.376	0.025	0.34	19.87	0.948	0.029	0.308	29.554	0.02	0.152	1.126	0.037	0.026	0.382	0.091	0	

Annexe 42 (suite) : Tableau des résultats des analyses géochimiques des sédiments du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH)

N°	Profondeur en m	Teneur en eau	Pourcent	Carbone total	Azote total	Hydrogène total	Résidu insoluble	Carbone organique	Azote organique	Hydrogène organique	Calcium	Potassium	Strontium	Magnésium	Sodium	Manganèse	Fer	Aluminium	Orthophosphates	Silice
98	253a	25.76	50.57	10.1616	0.0267	0.3372	20.13	0.609	0.023	0.267	29.246	0.03	0.14	2.042	0.028	0.029	0.482	0.145	0.098	0.797
99	254	24.46	40.2	11.9299	0.0175	0.2074	8.51	0.826	0.077	0.143	27.221	0.036	0.141	1.821	0.028	0.026	0.36	0.067	0.086	0.496
100	256a	26.19	50.8	9.5008	0.0331	0.368	24.5	0.639	0.028	0.357	27.265	0.04	0.132	1.953	0.026	0.03	0.52	0.173	0.1	0.92
101	2677	27.64	52.8	9.9377	0.0375	0.3245	21.73	0.783	0.028	0.249	29.177	0.027	0.126	1.496	0.025	0.026	0.414	0.134	0.09	0.703
102	2691	25.84	47.37	10.0866	0.0282	0.3381	20.73	0.641	0.025	0.255	30.163	0.026	0.125	1.759	0.026	0.027	0.438	0.099	0.098	0.627
103	2705	27.49	48.57	10.2651	0.0395	0.3534	20.1	0.888	0.03	0.327	30.1	0.024	0.158	1.673	0.027	0.024	0.388	0.128	0.102	0.713
104	2710	24.36	48.57	10.3192	0.041	0.3551	19.45	0.812	0.033	0.296	29.404	0.029	0.171	2.445	0.031	0.028	0.459	0.128	0.094	0.794
105	2831	26.25	52.33	8.8363	0.0331	0.3637	28.4	0.581	0.023	0.317	28.916	0.024	0.085	1.289	0.02	0.027	0.437	0.13	0.103	0.614
106	2848	23.27	48.17	8.6663	0.0283	0.2833	29.55	0.485	0.022	0.318	28.107	0.028	0.078	1.058	0.019	0.026	0.402	0.158	0.108	0.756
107	2853	24.08	43.77	9.5932	0.0356	0.3758	23.6	0.638	0.03	0.319	30.558	0.023	0.082	1.227	0.021	0.027	0.449	0.158	0.119	0.756
108	2889	22.66	44.57	8.9654	0.0233	0.3736	26.73	0.456	0.023	0.369	28.924	0.036	0.082	1.416	0.027	0.031	0.727	0.183	0.108	0.986
109	2978	29.23	56.8	8.5721	0.021	0.3786	29.48	0.455	0.023	0.337	27.663	0.005	0.081	1.38	0.021	0.031	0.599	0.194	0.124	1.016
110	2988	24.1	53.67	9.6796	0.0223	0.326	21.68	0.457	0.02	0.299	30.906	0.057	0.078	1.477	0.019	0.028	0.53	0.298	0.105	1.016
111	3003	26.99	47.6	10.8195	0.0312	0.3186	16.36	0.928	0.025	0.209	33.436	0.018	0.169	1.863	0.031	0.023	0.315	0.09	0.109	0.635
112	3007	26.72	55.4	10.9166	0.0457	0.3575	18.69	1.013	0.037	0.255	29.406	0.025	0.171	1.807	0.029	0.024	0.42	0.144	0.092	0.878
113	3015	27.42	50	10.8651	0.0505	0.3688	18.91	1.046	0.039	0.282	29.343	0.026	0.174	1.834	0.031	0.024	0.388	0.14	0.101	0.823
114	3028	27.73	50.47	10.9785	0.0379	0.3234	17.39	0.916	0.03	0.269	29.405	0.022	0.17	2.453	0.031	0.026	0.358	0.095	0.094	0.727
115	3040	28.2	50.77	10.7193	0.0413	0.3134	16.87	0.76	0.029	0.225	28.236	0.031	0.159	2.46	0.03	0.026	0.419	0.152	0.115	1.006
116	3058	28.68	54.2	10.6711	0.0413	0.2972	16.8	0.836	0.03	0.254	29.755	0.026	0.168	2.424	0.036	0.026	0.37	0.124	0.095	0.803
117	3075	26.97	48.9	11.4363	0.0483	0.3309	15.1	1.197	0.039	0.25	30.551	0.02	0.19	2.175	0.036	0.024	0.332	0.085	0.091	0.647
118	3104	27.84	49.93	12.0871	0.033	0.299	11.68	1.364	0.029	0.202	31.632	0.02	0.207	2.625	0.04	0.022	0.326	0.091	0.095	0.774
119	3121	24.89	41.57	12.4501	0.0215	0.2394	6.78	1.098	0.022	0.144	34.6	0.01	0.159	2.322	0.034	0.023	0.269	0.093	0.076	0.331
120	3134	32.45	56.47	12.0339	0.0479	0.3309	13.43	1.601	0.044	0.235	31.257	0.021	0.207	2.129	0.036	0.023	0.333	0.095	0.09	0.787
121	3142	30.11	53.9	11.4299	0.0328	0.3404	15.7	1.285	0.047	0.251	30.672	0.019	0.19	2.331	0.033	0.024	0.331	0.08	0.083	0.626
122	3181	30.2	55.77	11.734	0.0472	0.3339	13.58	1.306	0.041	0.223	30.769	0.022	0.201	2.181	0.034	0.024	0.343	0.095	0.084	0.777
123	3198	36.9	58.3	14.738	0.1375	0.7345	17.6	4.778	0.142	0.593	29.483	0.015	0.234	2.012	0.034	0.022	0.427	0.074	0.082	0.674
124	3208	39.09	54.2	19.3727	0.2403	1.3049	27.37	11.407	0.229	1.226	26.079	0.016	0.218	2.132	0.032	0.02	0.651	0.064	0.082	0.676
125	3223	31.26	55.23	11.9574	0.0515	0.3368	13.35	1.402	0.043	0.21	31.272	0.019	0.199	2.351	0.033	0.024	0.328	0.079	0.079	0.657
126	3228	25.42	45.13	11.8312	0.0221	0.214	8.81	0.839	0.02	0.13	33.727	0.012	0.158	2.242	0.034	0.024	0.269	0.041	0.089	0.408
127	2563	28.53	53.67	11.4509	0.0441	0.2991	13.98	0.837	0.033	0.206	30.655	0.022	0.174	2.295	0.031	0.026	0.354	0.095	0.085	0.757
128	3277	33.56	60.07	12.3173	0.0586	0.3737	12.44	1.843	0.048	0.249	31.615	0.018	0.197	1.968	0.034	0.024	0.333	0.075	0.079	0.644
129	3291	29.85	54.73	10.9851	0.0394	0.2858	15.12	0.703	0.029	0.162	29.545	0.031	0.157	2.293	0.036	0.028	0.41	0.154	0.094	0.96
130	3300	27.5	53.9	11.1465	0.0429	0.297	13.54	0.813	0.031	0.205	31.019	0.025	0.17	2.366	0.032	0.026	0.374	0.098	0.082	0.806
131	3314	29.49	55.63	10.9248	0.0402	0.2944	14.64	0.648	0.028	0.231	30.355	0.02	0.154	2.808	0.031	0.025	0.494	0.148	0.106	0.885
132	3323	29.48	55.13	11.0009	0.0381	0.2987	14.8	0.654	0.027	0.246	29.876	0.028	0.154	2.881	0.031	0.028	0.396	0.128	0.093	0.772
133	3344	28.68	55.83	10.7263	0.0352	0.3036	15.66	0.693	0.028	0.252	28.907	0.039	0.157	3.122	0.037	0.023	0.457	0.195	0.097	1.112
134	3361	29.62	54.6	10.5371	0.039	0.3402	18.35	0.722	0.029	0.272	28.776	0.034	0.152	2.413	0.032	0.028	0.381	0.159	0.091	0.761
135	3378	29.76	52.67	11.0347	0.0353	0.3191	14.62	0.74	0.028	0.274	30.291	0.021	0.169	2.549	0.034	0.026	0.31	0.085	0.085	0.537
136	3395	28.66	55.03	10.6372	0.0419	0.3326	17.43	0.708	0.031	0.259	30.082	0.026	0.147	1.903	0.028	0.027	0.327	0.099	0.086	0.607
137	3412	22.59	38.7	12.588	0.0212	0.2195	5.2	1.251	0.024	0.151	35.735	0.006	0.123	1.384	0.023	0.025	0.297	0.022	0.062	0.219
138	3429	27.36	49.8	10.8443	0.0418	0.3106	18.37	1.053	0.04	0.279	29.814	0.023	0.141	1.657	0.027	0.025	0.332	0.094	0.084	0.574
139	3447	28.75	53.1	11.0684	0.0344	0.2868	13.8	0.636	0.023	0.211	30.806	0.029	0.156	2.425	0.032	0.027	0.343	0.117	0.082	0.809
140	3503	24.53	43.83	11.968	0.0236	0.2375	10.22	1.219	0.023	0.171	33.239	0.016	0.147	1.912	0.036	0.024	0.321	0.065	0.1	0.487
141	3520	27.67	41.5	12.7469	0.0311	0.339	8.94	1.919	0.035	0.248	33.674	0.012	0.151	2.12	0.035	0.025	0.286	0.042	0.087	0.37
142	3538	26.34	46.27	11.3181	0.0397	0.3526	15.59	1.53	0.038	0.265	30.645	0.02	0.17	1.975	0.033	0.025	0.356	0.077	0.048	0.547
143	3556	27.11	50.6	10.945	0.0473	0.3079	17.06	1.085	0.035	0.227	29.951	0.022	0.158	1.938	0.029	0.026	0.329	0.087	0.093	0.546
144	3578	26.63	52.2	10.7574	0.0382	0.3173	17.18	0.672	0.022	0.166	29.811	0.023	0.155	1.821	0.02	0.026	0.34	0.079	0.082	0.318
145	3592	35.32	54.63	14.027	0.1222	0.7131	20.83	4.872	0.126	0.609	28.478	0.019	0.195	1.811	0.037	0.023	0.456	0.061	0.063	0.497
146	3611	25.72	49.63	10.5185	0.0404	0.3113	19.2	0.923	0.033	0.239	29.546	0.032	0.145	1.765	0.028	0.026	0.335	0.093	0.081	0.577
147	3610	26.57	51.47	10.1509	0.0281	0.2598	20.63	0.699	0.026	0.197	29.11	0.027	0.126	1.725	0.029	0.027	0.323	0.079	0.088	0.487
148	3630	26.05	48.97	9.9776	0.0355	0.2718	24.53	1.091	0.037	0.227	27.621	0.03	0.123	1.43	0.026	0.02	0.343	0.09	0.088	0.535
149	3649	27.22	48.27	10.6169	0.0413	0.2985	20.99	1.003	0.036	0.205	29.053	0.027	0.136	1.608	0.028	0.02	0.323	0.08	0.091	0.497
150	3659	30.19	53.53	12.0523	0.0619	0.5106	27.65	3.128	0.065	0.446	27.572	0.022	0.137	1.941	0.031	0.018	0.373	0.072	0.127	0.606
151	3875	23.96	45.13	9.6149	0.0342	0.2588	24.08	0.647	0.021	0.189	27.855	0.051	0.113	1.362	0.026	0.021	0.339	0.1	0.09	0.596
152	4638	23.32	35.73	11.0016	0.031	0.2332	14.43	0.771	0.016	0.14	31.093	0.022	0.13	1.961	0.03	0.019	0.309	0.083	0.094	0.544
153	3901	26.13	44.17	10.8451	0.0339	0.3042	21.7	1.393	0.037	0.262	33	0.025	0.168	1.839	0.033	0.022	0.366	0.088	0.097	0.597
154	4037	42.73	67.87	11.0207	0.0411	0.3042	17.05	1.022												

Annexe 43 : Descriptions des zones géochimiques à partir des analyses chimiques du sondage LLC1 du Marais du Col-des-Roches

1.2. LA SPÉCIATION DES CARBONATES : LES ANALYSES CHIMIQUES DE LA PHASE ACIDO-SOLUBLE

1.2.1. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble du forage LLC1

1.2.1.1. Zone G1 (- 41 m, - 13 m)

La zone G1, correspondant aux argiles silteuses grises couvrant le Pléniglaciaire et le Tardiglaciaire, se caractérise par un pourcentage de calcium quasiment constant (30 %), sauf en G1c. La teneur en magnésium permet de scinder la zone G1 en quatre sous-zones. Les sous-zones G1a et G1b se distinguent par la variation du taux de strontium dans la première partie de G1b. La sous-zone G1c, correspondant à des gyttjas, se différencie des deux sous-zones précédentes par une importante diminution du taux de magnésium, de fer, de potassium, de manganèse et de phosphates ; à l'opposé, on y observe une légère hausse du pourcentage de calcium. La sous-zone G1d qui correspond à la fin du faciès argileux montre une composition chimique identique à celles des sous-zones G1a et b à l'exception du taux de magnésium qui est le plus bas de cette unité lithostratigraphique.

1.2.1.2. Zone G2 (- 12, - 9 m)

La zone géochimique G2 correspond aux craies lacustres. Elle se caractérise par le

pourcentage de calcium élevé (80 %), par un taux de sodium trois fois plus important que dans le faciès argileux et par une diminution très nette des taux de fer, silice, aluminium, potassium, manganèse et phosphates ; le taux de strontium décroît également mais pas de manière aussi marquée que les éléments précédents.

1.2.1.3. Zone G3 (- 9, - 7.20 m), les craies organiques

Dans cette sous-zone, on observe à nouveau des pourcentages de silice, de fer, d'aluminium, de potassium et de phosphates supérieurs à ceux qui ont été relevés dans les craies lacustres, mais inférieurs à ceux du faciès argileux. Les taux de magnésium, de strontium et de manganèse montrent également une hausse, mais les valeurs maximales sont très inférieures à celles qui étaient relevées dans les argiles silteuses grises.

1.2.1.4. Zone G4 (- 3, - 7.20 m)

Cette zone géochimique correspondant aux gyttjas s'identifie par la stabilité de ses taux en magnésium, manganèse, strontium et sodium. Les autres éléments montrent des variations bien marquées.

Annexe 44 : Tableau des pourcentages des différents paramètres géochimiques mesurés sur les sédiments des sondages jumeaux LLC1-3/4 et LLC1-5 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH)

N°	profondeur en cm	Residu insoluble	carbone total	hydrogène total	azote total	calcium dans RI	potasse dans RI	hydrogène dans RI	carbone total	carbone organique	cobalt	magnésium	silice	aluminium	sodium	potassium	fer	manganèse	orthophosphates	Profondeur	porosité	taux en eau
1	845	12.124	14.644	0.605	0.13	26.215	1.919	0	14.644	3.231	34.228	0.11	0.164	0.069	0.009	0.012	0.15	0.008	0.008	845	43.2	44.35
2	855	12.128	14.274	0.592	0.284	32.745	1.692	3.148	14.279	2.739	34.216	0.337	0.172	0.053	0.009	0.016	0.151	0.008	0.052	850	45.2	45.03
3	865	9.548	13.838	0.531	0.256	22.1	1.744	0	13.848	2.11	34.224	0.19	0.178	0.093	0.008	0.017	0.15	0.008	0.052	855	46	42.28
4	875	10.959	13.417	0.461	0.215	15.779	1.264	0.003	13.417	1.729	33.975	0.394	0.179	0.081	0.008	0.016	0.148	0.009	0.058	860	53.2	48.36
5	885	10.645	13	0.454	0.199	5.651	0.468	0.87	13	0.602	34.451	0.389	0.176	0.057	0.007	0.013	0.131	0.009	0.053	865	60.8	52.11
6	895	12.295	12.632	0.368	0.166	14.394	1.773	2.883	12.632	1.77	33.669	0.406	0.167	0.072	0.009	0.015	0.143	0.01	0.057	870	40.2	39.72
7	905	13.493	12.708	0.461	0.204	20.235	1.571	2.894	12.708	2.798	33.154	0.375	0.162	0.084	0.009	0.015	0.143	0.01	0.057	875	40.2	39.72
8	915	15.187	13.54	0.515	0.26	23.008	1.652	2.977	13.54	3.494	32.475	0.378	0.161	0.078	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	880	54.8	48.87
9	925	16.65	14.275	0.643	0.305	22.203	1.875	3.081	14.275	3.78	31.221	0.39	0.159	0.092	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	885	38.6	40.63
10	935	19.98	14.97	0.808	0.391	23.523	1.979	3.058	14.97	4.7	30.977	0.392	0.155	0.092	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	890	38.6	40.63
11	945	20.214	15.14	0.892	0.416	24.77	1.725	3.131	15.14	5.007	30.261	0.383	0.162	0.089	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	895	45.8	41.79
12	955	23.714	16.797	0	0.614	28.321	1.975	3.544	16.797	7.282	28.174	0.333	0.132	0.086	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	900	43.8	44.79
13	965	24.799	16.786	1.173	0.554	28.076	1.885	4.443	16.786	6.776	28.639	0.35	0.138	0.082	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	905	47.6	48.57
14	975	35.631	23.925	2.1	1.005	40.726	2.278	4.284	23.925	14.511	22.639	0.188	0.1	0.086	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	910	47.6	48.57
15	985	17.306	16.239	0.909	0.413	33.069	1.922	3.709	16.239	5.733	31.85	0.194	0.172	0.089	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	915	59.2	53.92
16	995	18.062	17.449	1.186	0.479	36.67	2.013	4.069	17.449	6.77	31.441	0.242	0.177	0.089	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	920	59.2	53.92
17	1005	15.018	16.036	0.952	0.428	30.831	2.35	4.41	16.036	5.839	32.533	0.263	0.132	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	925	56	65.88
18	1015	7.884	14.053	0.484	0.229	35.062	2.628	4.239	14.053	2.47	35.788	0.224	0.144	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	930	62	50.74
19	1025	8.084	14.643	0.556	0.256	35.524	2.407	4.216	14.643	3.014	35.788	0.218	0.137	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	935	60.2	52.08
20	1030	17.919	16.48	1.014	0.454	31.084	2.028	3.844	16.48	5.57	31.18	0.198	0.128	0.088	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	940	57.2	53.86
21	1035	4.644	12.86	0.282	0.119	23.081	1.732	3.124	12.86	1.072	37.055	0.238	0.15	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	945	38.4	46.38
22	1045	3.188	12.581	0.216	0.086	23.748	1.892	3.193	12.581	0.757	37.088	0.266	0.151	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	950	31.8	50
23	1055	3.38	12.971	0.221	0.099	23.551	1.9	3.188	12.971	0.96	37.27	0.294	0.165	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	955	46.4	51.79
24	1065	3.379	12.697	0.204	0.089	20.429	1.758	2.931	12.697	0.69	37.862	0.311	0.166	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	960	41.2	43.46
25	1075	2.596	12.656	0.211	0.086	26.185	2.18	3.348	12.656	0.68	38.517	0.282	0.157	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	965	50.2	46.83
26	1085	3.341	12.897	0.245	0.108	27.421	2.409	3.768	12.897	0.916	37.848	0.311	0.166	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	970	43	41.67
27	1095	2.142	12.339	0.215	0.097	33.937	3.197	4.572	12.339	0.723	38.164	0.337	0.189	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	975	43.2	43.12
28	1105	2.773	12.808	0.198	0.091	21.71	2.4	3.834	12.808	0.753	37.658	0.316	0.181	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	980	41.4	44.83
29	1115	3.944	12.483	0.313	0.131	33.057	1.97	3.424	12.483	0.909	37.489	0.315	0.184	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	985	37	43.02
30	1125	3.36	12.456	0.293	0.102	23.058	1.832	0	12.456	1.236	37.181	0.287	0.184	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	990	46.8	45.35
31	1132	7.002	12.992	0.205	0.121	20.128	1.526	3.015	12.992	1.409	36.277	0.296	0.185	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	995	44	41.59
32	1135	7.516	12.961	0.368	0.154	21.979	1.617	3.177	12.961	1.608	35.905	0.303	0.191	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1000	31	39.54
33	1137	12.425	14.375	0.626	0.268	25.558	1.698	3.396	14.375	3.76	34.498	0.26	0.171	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1005	34.6	41.69
34	1145	6.14	12.564	0.208	0.118	18.748	1.502	2.98	12.564	1.151	36.197	0.299	0.184	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1010	33.2	43.57
35	1155	3.204	12.547	0.218	0.084	21.273	1.765	3.193	12.547	0.682	38.012	0.333	0.205	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1015	42.3	38.97
36	1165	3.22	12.632	0.189	0.082	21.123	1.885	3.269	12.632	0.68	38.369	0.324	0.205	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1020	29.4	43.62
37	1175	3.125	12.552	0.201	0.075	21.615	1.768	3.348	12.552	0.675	39.328	0.325	0.191	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1025	34	38.29
38	1185	3.954	12.501	0.232	0.09	19.282	1.993	2.996	12.501	0.763	38.096	0.301	0.199	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1030	35.6	40
39	1195	4.912	12.474	0.259	0.096	16.822	1.325	2.8	12.474	0.826	37.646	0.309	0.207	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1035	41	39.63
40	1200	5.093	12.381	0.242	0.05	15.314	2	3.003	12.381	0.78	36.967	0.349	0.204	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1040	45	43.27
41	1205	6.075	12.304	0.289	0.06	15.05	1.084	2.806	12.304	0.914	36.081	0.371	0.231	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1045	43.8	40.86
42	1210	7.21	12.378	0.311	0.063	15.081	0.873	2.717	12.378	1.163	35.884	0.369	0.221	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1050	35.4	36.8
43	1215	8.820	12.333	0.359	0.145	16.881	0.824	2.866	12.333	1.491	34.872	0.384	0.245	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1055	31.13	34.93
44	1220	13.664	13.067	0.444	0.081	18.025	1.804	0	13.067	2.543	31.872	0.601	0.245	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1060	29.07	36.06
45	1225	13.042	12.866	0.447	0.089	17.338	1.806	2.683	12.866	2.313	33.13	0.814	0.224	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1065	31.2	35.03
46	1235	10.425	12.508	0.383	0.085	16.236	1.892	2.938	12.508	1.695	33.69	0.898	0.201	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1070	31.07	33.48
47	1235	12.809	13.43	0.577	0.164	21.452	1.353	0.014	13.43	2.748	32.077	1.078	0.184	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1075	33.07	33.72
48	1240	10.702	12.21	0.347	0.081	11.291	0.725	0.169	12.21	2.409	33.146	1.049	0.184	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1080	29.33	36.07
49	1245	8.271	12.05	0.368	0.048	10.411	0.651	2.545	12.05	0.861	34.426	0.923	0.215	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1085	38.67	35.68
50	1255	8.744	11.559	0.232	0.043	8.53	0.551	2.249	11.559	0.746	33.958	0.927	0.215	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1090	33.47	35.3
51	1260	5.668	11.64	0.187	0.046	7.23	0.478	2.213	11.64	0.41	33.839	0.993	0.215	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1095	33.67	42.25
52	1265	12.516	10.381	0.215	0.142	6.234	0.412	2.145	10.381	0.78	32.95	0.936	0.232	0.093	0.009	0.013	0.143	0.01	0.057	1100	23.3	33.36
53	1275	9.326	10.389	0.324	0.037	5.068	0.251	0	10.389	0.473	31.689	1.279	0.166	0.093								

Annexe 45 : Descriptions des zones géochimiques à partir des analyses chimiques des sondages LLC1 à 5 du Marais du Col-des-Roches

1.2.2. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble des forages LLC1-2 à 5

Les analyses des forages LLC1-2 à 5 permettent de faire un zoom précis sur le passage argiles silteuses grises (zone G1)-craies lacustres (zone G2) du forage LLC1 de la figure 2.75. Les 86 échantillons ont été analysés. Les données brutes issues des analyses sont dans l'annexe n° 29. La variation des paramètres mesurés, représentés en fonction de la profondeur, permet de différencier 5 zones géochimiques.

1.2.2.1. Zone 1 (-13, -12.15 m), la fin des argiles silteuses grises et la gyttja

Cette zone géochimique, qui correspond à la fin du faciès argileux du Dryas récent, est caractérisée par une hausse progressive du taux de calcium qui est accompagnée par une diminution régulière du magnésium, de la silice, du potassium, du fer et du manganèse (sous-zones G1a et b). La sous-zone G1c montre une légère hausse de tous les paramètres que nous venons de citer.

La sous-zone G1 d correspond à un niveau de gyttja qui a enregistré le début de l'Holocène. Une augmentation très nette des pourcentages d'orthophosphates, de sodium, associée à la chute du taux de magnésium, permet de différencier cette sous-zone.

1.2.2.2. Zone 2 (- 12.15, - 10.30 m), les craies lacustres

Cette zone se différencie par des taux de calcium (37 %), de magnésium (0.35 %) et de

sodium (0.009 %) presque constants. Les taux de strontium et de manganèse montrent une tendance décroissante. Les taux de silice, d'aluminium, de potassium, de fer et de phosphates sont moins importants que dans la zone G1, mais ils sont très variables (ils montrent en particulier une hausse à 11.37 et à 10.30 m dans les niveaux organiques). On remarque que ces augmentations ne sont pas ponctuelles mais qu'elles sont progressives, comme leurs diminutions après les niveaux organiques.

1.2.2.3. Zone 3 (-10.30, - 9.75 m), les craies organiques

La zone G3 se distingue par une diminution du taux de calcium, de magnésium, de strontium et de manganèse jusqu'à un minimum correspondant à un niveau organique à 9.75 m. Les autres éléments majeurs (Si, Al, Fe, K et PO₄) montrent une hausse très marquée jusqu'à ce niveau.

1.2.2.4. Zone 4 (- 9.75, - 8.85 m), les craies organiques

Cette zone se distingue par un taux de calcium croissant. A l'opposé, les pourcentages de silice, d'aluminium et de fer montrent une décroissance régulière. Les taux de magnésium, strontium, sodium et de manganèse restent fixes.

1.2.2.5. Zone 5 (- 8.85, -8.45 m), le passage des craies organiques aux gyttjas

Cette zone chimique est caractérisée par une diminution du pourcentage de silice et d'aluminium. Le taux de calcium est encore en progression tandis que celui du magnésium et des orthophosphates régresse.

Annexe 46 : Tableau des résultats des analyses géochimiques des sédiments du sondage LLC2 du Marais du Col-des-Roches, 910 m (NE, CH)

N°	Profondeur mètre	Teneur en g/g	Permeabilité	Acide total	Carbone total	Hydrogène total	Nitrate inorganique	Carbone diss. RI	Acide diss. RI	Hydrogène diss. RI	Carbone organique	Acide organique	Hydrogène organique	Calcium	Strontium	Magnésium	Manganèse	Sodium	Silice	Orthophosphates	Aluminium
1	37	57.7	69	0.933	14.945	1.401	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	67	78.3	84	2.06	31.611	4.104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	78	78.7	86	1.852	32.988	4.299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	89	83.1	93.3	1.613	36.433	4.281	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	100	83.8	91.7	1.571	39.068	5.049	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	111	83.4	89	1.35	35.499	4.703	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	122	81.4	85	1.755	38.464	5.064	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	134	81.7	91	1.609	34.343	4.682	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	145	82.9	87.3	1.676	45.502	5.418	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	165	73.1	85	1.525	30.705	4.162	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	175	76.3	87.7	1.811	28.67	4.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	184	85.3	94	1.748	42.533	5.422	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	196	81.8	89.7	1.933	40.837	5.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	208	83.4	84	1.885	41.814	5.333	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	213	86.2	91.7	1.713	28.086	4.058	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	235	85.9	88.3	1.969	38.201	4.922	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	253	84.9	86.3	1.896	38.742	5.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	246	84	90.7	1.973	40.048	5.276	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	259	81.0	90	1.628	27.352	4.116	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	268	84.9	92	2.013	40.862	5.105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	266	80.4	86	1.73	35.439	5.335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	303	82.9	89.7	1.645	34.968	4.737	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	320	84.3	91.3	1.824	40.919	5.134	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	337	85	88.7	1.783	40.297	5.043	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	355	85.6	88.3	2.087	35.519	4.789	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	372	84.3	93	1.576	44.544	5.472	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	388	85.4	88	1.945	46.145	5.687	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	399	83.4	90.3	1.89	47.987	5.306	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	409	84.6	87.7	2.036	47.182	5.504	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	419	85.4	93.1	1.688	42.66	5.263	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	452	80.7	88	1.489	30.623	4.102	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	465	80.4	86.3	1.584	37.787	4.946	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	479	81.3	86.3	1.594	44.029	5.387	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	466	80.2	87.7	1.431	30.48	4.085	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	476	82.5	88	2.037	38.063	4.937	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	483	82.2	87.7	1.51	35.981	4.154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	501	83.3	86.3	2.024	41.538	5.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	513	84.4	88.3	2.084	44.075	5.335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	528	85.2	88.3	1.714	39.908	4.924	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	537	84.1	87	1.88	44.956	5.433	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	549	81.9	87.7	1.544	44.118	5.166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	563	80.2	84	1.871	41.003	4.874	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	574	81.2	82	1.635	39.733	4.882	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	590	81.4	84.7	1.814	42.737	5.146	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	605	80.2	89.3	1.857	39.752	4.853	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	631	76.6	96	1.427	31.092	3.198	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	636	82.1	72.7	0.933	30.813	2.003	40.370	31.851	2.096	4.176	12.854	0.817	1.664	47.390	0.069	0.350	0.006	0.065	0.868	0.078	0.256
48	681	64.3	77	1.071	20.744	2.157	45.250	31.417	2.243	4.159	14.216	1.015	1.875	43.612	0.086	0.291	0.008	0.068	0.951	0.087	0.279
49	686	44.6	87	0.317	12.38	0.773	78.220	15.639	1.033	2.508	4.414	0.797	0.768	59.351	0.083	0.408	0.009	0.067	0.618	0.086	0.159
50	694	46.5	87	0.36	17.995	0.907	31.450	15.119	1.049	2.439	4.755	0.350	0.767	56.691	0.097	0.378	0.011	0.067	0.795	0.103	0.163
51	709	46.6	81	0.245	13.019	0.671	31.320	14.844	1.036	2.468	4.680	0.334	0.795	57.347	0.095	0.350	0.011	0.064	0.887	0.103	0.165
52	723	45.8	68.3	0.314	13.118	0.884	30.540	15.213	1.120	2.495	5.001	0.346	0.800	56.204	0.094	0.406	0.011	0.065	0.969	0.102	0.178
53	738	43.5	61.7	0.324	13.439	0.949	28.600	16.008	1.069	2.572	4.378	0.306	0.735	60.350	0.098	0.537	0.011	0.067	0.835	0.094	0.156
54	752	45.9	63.3	0.262	13.395	0.959	27.560	16.744	1.126	2.839	5.109	0.351	0.774	59.058	0.102	0.517	0.010	0.066	0.824	0.099	0.155
55	766	47.4	68.7	0.338	14.006	0.944	25.880	19.280	1.156	2.827	4.974	0.354	0.739	67.710	0.105	0.439	0.009	0.064	0.813	0.087	0.152
56	781	42.3	65	0.193	12.333	0.814	16.710	17.614	1.159	2.548	2.944	0.194	0.436	70.156	0.142	0.420	0.008	0.068	0.548	0.068	0.091
57	792	36.7	61	0.148	12.605	0.496	16.050	16.708	1.087	2.580	2.681	0.174	0.314	68.670	0.145	0.450	0.008	0.068	0.435	0.063	0.064
58	805	37.6	57	0.197	12.767	0.511	17.780	18.359	1.186	2.724	3.265	0.211	0.484	66.427	0.157	0.456	0.008	0.067	0.537	0.071	0.099
59	818	40	56.3	0.215	13.086	0.616	18.950	17.361	1.154	2.694	3.385	0.219	0.510	67.791	0.155	0.509	0.008	0.067	0.533	0.073	0.101
60	831	40.6	61.3	0.221	13.125	0.659	18.570	18.789	1.030	2.638	3.490	0.201	0.488	59.645	0.123	0.456	0.008	0.068	0.664	0.075	0.122
61	844	40.2	68.3	0.478	16.392	1.13	34.950	28.968	1.704	3.909	7.226	0.435	0.975	63.236	0.096	0.476	0.008	0.067	0.845	0.097	0.142
62	857	44.3	64	0.265	13.860	0.697	20.000	21.364	1.275	3.076	4.272	0.255	0.615	71.617	0.126	0.666	0.008	0.065	0.616	0.082	0.122
63	870	36.5	56.3	0.159	12.348	0.46	12.970	17.846	1.115	2.647	2.535	0.157	0.343	71.023	0.138	0.366	0.007	0.062	0.416	0.056	0.069
64	883	34.9	58	0.161	12.477	0.483	13.860	16.839	1.078	2.459	2.341	0.150	0.341	72.266	0.155	0.435	0.007	0.071	0.451	0.063	0.082
65	896	37.7	61	0.182	12.640	0.582	16.720	16.702	0.996	2.355	2.799	0.167	0.394	67.724	0.150	0.447	0.008	0.074	0.533	0.070	0.100
66	908	36.3	57	0.206	13.043	0.613	18.270	16.751	0.967	2.358	3.061	0.177	0.431	66.807	0.144	0.487	0.008	0.068	0.805	0.077	0.136
67	919	36.5	60.7	0.257	13.281	0.698	20.770	17.929	1.210	2.759	3.124	0.231	0.573	64.349	0.133	0.586	0.009	0.076	0.827	0.086	0.130
68	931	36.2	59	0.218	13.389	0.673	19.170	19.547	1.049	2.739	3.747	0.201	0.525	64.232	0.132	0.669	0.013	0.081	0.982	0.100	0.127
69	943	38.8	58.3	0.197	13.545	0.649	19.740	20.719	1.051	2.881	3.576	0.187	0.476	67.466	0.135	0.649	0.010	0.076	0.706	0.101	0.094
70	954	34.4	54.7	0.116	12.811	0.477	11.640	19.065	0.938	2.491	2.219	0.109	0.390	70.223	0.154	0.466	0.010	0.075	0.605	0.100	0.076
71	967	32.3	54.3	0.097	12.656	0.423	10.670	20.309	0.809	2.604	2.209	0.098	0.383	77.622	0.157	0.523	0.010	0.081	0.		

Annexe 47 : Descriptions des zones géochimiques à partir des analyses chimiques du sondages LLC2 du Marais du Col-des-Roches

1.2.3. Les analyses chimiques de la phase acido-soluble du forage LLC2

35 échantillons prélevés dans les argiles silteuses grises, les gyttjas et les sables à matrice argileuse entre -13 et -6 m de profondeur ont été analysés. En revanche, les tourbes ne l'ont pas été. Les données brutes se trouvent dans l'annexe n° 30.

La variation des éléments chimiques mesurés permet de distinguer 2 zones géochimiques dont une peut être scindée en plusieurs sous-zones, figure 2.76.

1.2.3.1. Zone G1 (-13, - 6.60 m)

Cette zone se différencie par un pourcentage de calcium supérieur à 60 %. Les sous-zones G1a et G1b correspondent aux argiles silteuses grises. Le taux de strontium y est croissant. Des variations importantes sont

observées dans la sous-zone G1a ; mais tous les éléments majeurs mesurés montrent des valeurs maximales atteintes à la fin de cette sous-zone. D'une manière générale, les pourcentages de ces éléments diminuent dans la sous-zone G1b.

Les sous-zones G1c et G1d correspondent aux faciès des gyttjas. Ces deux sous-zones se distinguent par une diminution des taux de calcium et de strontium. A l'opposé, les pourcentages de silice, d'aluminium, de manganèse et d'orthophosphates présentent un gradient croissant. Seul le taux de sodium reste en partie stable.

1.2.3.2. Zone G2 (-6.60, - 6.40 m), le niveau de sable dans une matrice argileuse

Cette zone correspond à la rapide augmentation du pourcentage d'aluminium parallèlement à celle de la silice. A l'opposé, le taux de calcium régresse ainsi que celui du strontium, du magnésium, du manganèse et des phosphates.

Annexe 48 : Tableau des pourcentages des différents paramètres chimiques mesurés sur les sédiments du sondage 2 du lac d'ILAY, 778 m (Jura, France)

[illegible]

Annexe 49

Annexe 49 : Descriptions des zones géochimiques à partir des analyses chimiques du sondage d'Ilay (Jura, France)

2.2. LA SPÉCIATION DES CARBONATES

2.2.1. Zone G1 (- 170, - 112 cm), les craies lacustres inférieures

Cette zone géochimique (figure 2.85) est caractérisée par la teneur régulièrement décroissante des orthophosphates ; cet élément passe en effet de 0,040 à 0,015 %. Les teneurs en calcium (37 %), strontium (0.06 %), potassium (0.003%), fer (0.05 %) et en aluminium (0.010 %) sont constantes. En revanche, le taux de magnésium oscille entre 0,055 et 0,065 %. Celui du sodium montre un léger maximum à - 155 cm et à - 112 cm à la limite de la zone G1.

2.2.2. Zone G2 (- 112, - 62 cm), la suite des craies lacustres

La zone G 2 est caractérisée des teneurs stables en calcium, strontium, aluminium, potassium, fer et orthophosphates. Les taux de magnésium et de sodium augmentent régulièrement jusqu'à 85 cm puis diminuent ensuite à partir de cette cote. Le taux de manganèse décroît légèrement dans cette zone.

2.2.3. Zone G3 (- 62, - 50 cm), les premières gyttjas

La zone G3 se distingue par une diminution de 10 % environ du taux de calcium. Parallèlement, cette baisse est accompagnée de celle du magnésium et du manganèse. A l'opposé, les pourcentages de silice, d'aluminium, de sodium, de potassium et de fer augmentent légèrement. Les taux de strontium et d'orthophosphates sont inchangés.

2.2.4. Zone G4 (- 50, - 48 cm), l'intercalation crayeuse

Les tendances s'inversent par rapport à la zone précédente. Le calcium atteint de nouveau 40 % et les pourcentages des autres éléments diminuent.

2.2.5. Zone G5 (- 48, - 35 cm), le deuxième niveau de gyttja

La zone géochimique 5 est caractérisée par la diminution importante du calcium, du magnésium du strontium et du manganèse jusqu'à la cote 38 cm. Cette diminution se fait au profit de la hausse très marquée de la silice, de l'aluminium, du sodium, du potassium et du fer. Les orthophosphates augmentent légèrement. Après la cote 38 cm les gradients observés s'inversent très rapidement pour atteindre à nouveau les pourcentages obtenus dans les niveaux de craie inférieurs.

2.2.6. Zone G6 (- 35, - 8 cm), les craies lacustres supérieures

La zone G6 est caractérisée par un diminution régulière du taux de magnésium dans la première partie de la zone qui est associée à deux hausses ponctuelles du strontium. Ensuite, les pourcentages des éléments de cette craie lacustre sont identiques à ceux de la zone G2.

2.2.7. Zone G7 (- 8, 0 cm), la gyttja terminale

Le pourcentage de calcium passe de 35 à 25 % ; la hausse progressive de la silice, du sodium, du potassium, du fer, du magnésium et de PO_4 est caractéristique de la zone G7. Par ailleurs, les taux de magnésium et de strontium restent constants.

Diagramme 1 - Planche 2.11 -
Forage LLC 1, Pléniglaciaire et
Tardiglaciaire avec taxons tertiaires

PLÉNIGLACIAIRE

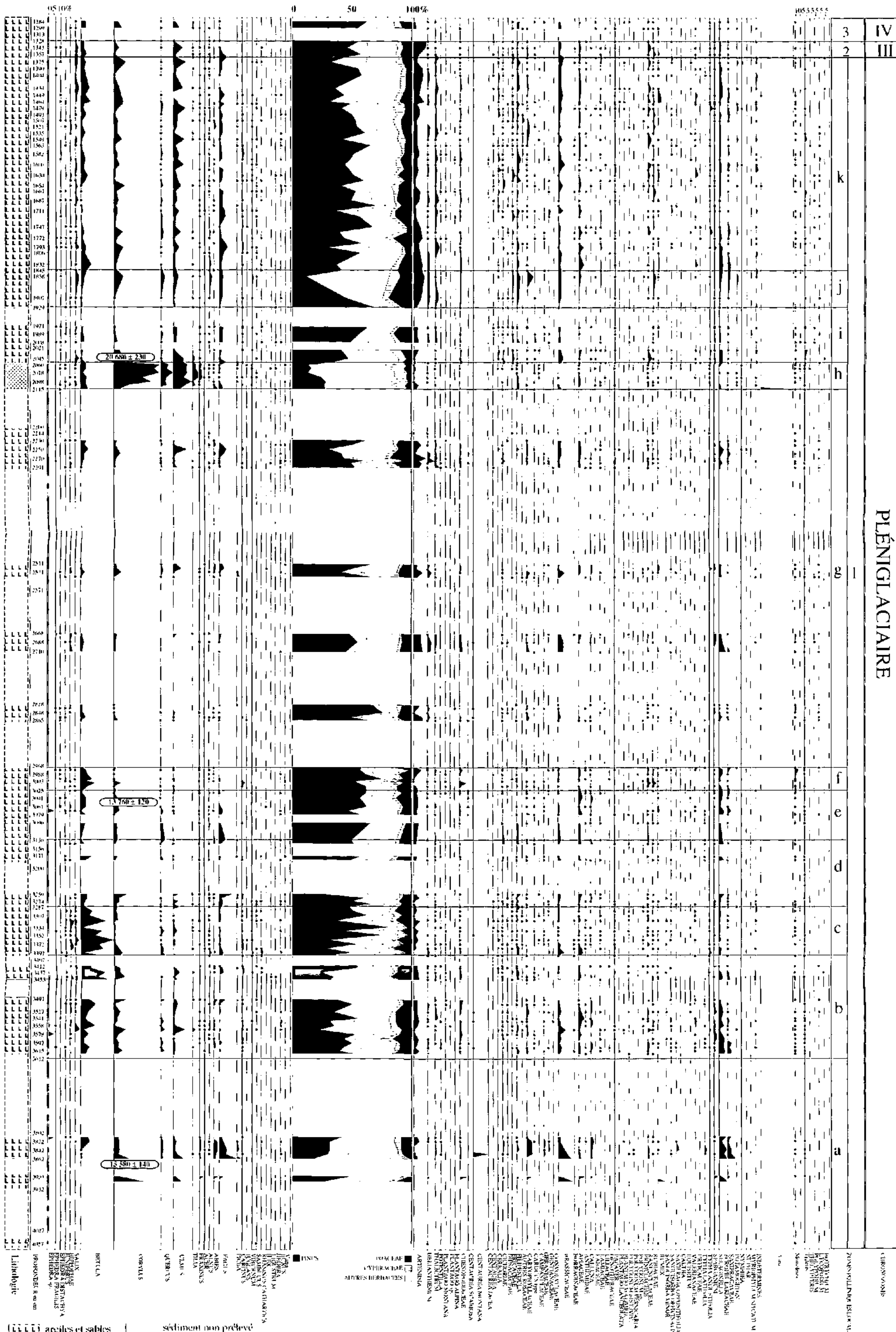


Diagramme 2 - Planche 2.12 -
Forage LLC 1, Pléniglaciaire et
Tardiglaciaire sans taxons tertiaires

Diagramme 3 - Planche 2.13-
forage LLC 1, Tardiglaciaire et
Holocène, carottier à piston

Diagramme 2.14 : Marais du Col-des-Roches (NE, CH) 910 m ; Forages LLC 1-2, LLC 1-3 et 6 ; de 1.30 m à 13.45 m (en pourcentages)

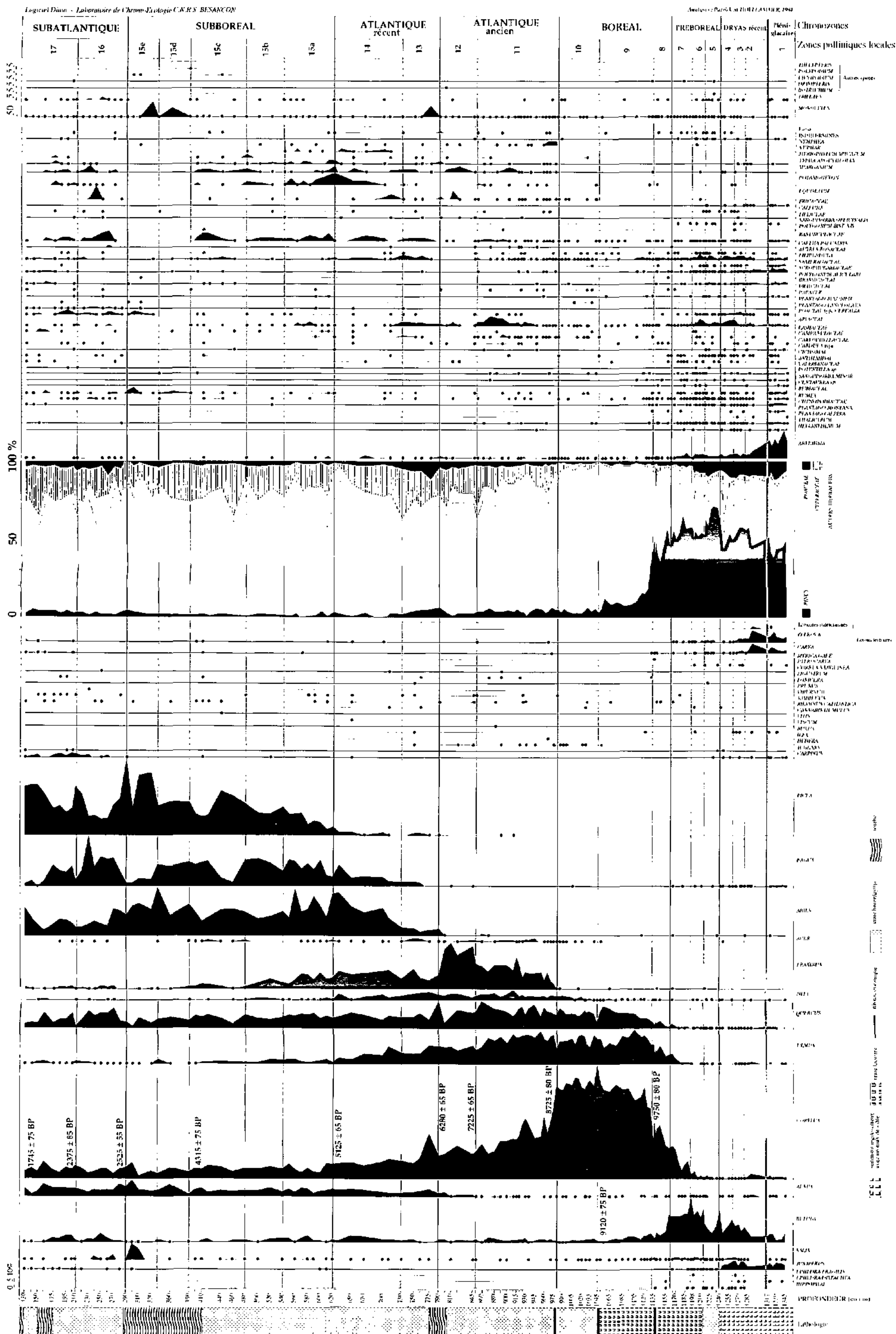


Diagramme 4 - Planche 2.14 -
Forages LLC 1 à 5, Tardiglaciaire et
Holocène, carottier russe