

**CONDITIONS ECOLOGIQUES DE LA REGENERATION SPONTANEE
DU *SPHAGNION MAGELLANICI* DANS LE JURA SUISSE
(TYPOLOGIE, PEDOLOGIE, HYDRODYNAMIQUE ET MICROMETEOROLOGIE)**

T H E S E

présentée à

La Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel (Suisse)

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR ÈS SCIENCES

par

Yvan MATTHEY

1996

- Jury:
- | | |
|----------------|---|
| Gobat, J.-M. | Professeur à l'Université de Neuchâtel, directeur de thèse |
| Dinel, H. | Dr. es Sc. Ministère de l'Agriculture, Ottawa, Canada |
| † Bruckert, S. | Professeur à l'Université de Besançon, France |
| Gaiffe, M. | Maître-assistante à l'Université de Besançon, France
représentante du professeur S. Bruckert. |
| Geiger, W. | Dr. es Sc. Chef de travaux au laboratoire d'écologie animale
de l'Université de Neuchâtel. |
| Buttler, A. | Dr. es Sc. Chef de travaux au laboratoire d'écologie végétale et de
phytosociologie de l'Université de Neuchâtel |

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Conditions écologiques de la régénération spontanée du
sphaignion magellanici dans le Jura suisse.

de M. Yvan Matthey

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL
FACULTÉ DES SCIENCES

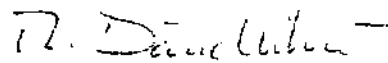
La Faculté des sciences de l'Université de
Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

Messieurs J.-M. Gobat, W. Geiger, A. Buttler,
H. Dinel (Ottawa), S. Bruckert (Besançon)
et Mme M. Gaiffe (Besançon)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 25 juin 1996

Le doyen:



R. Dändliker

**La science ne sert qu'à vérifier
les découvertes de l'instinct**

J. Cocteau

TABLE DES MATIERES

Avant-propos	VIII
Résumé	IX
Remerciements	XII

INTRODUCTION GENERALE

1. INTERET DE LA REGENERATION	1
2. OBJECTIFS ET ORGANISATION DE LA RECHERCHE	1

1^{ère} partie: TYPOLOGIE

INTRODUCTION	7
1. METHODOLOGIE	9
1.1. DEFINITION	9
1.2. REGION PROSPECTEE ET SELECTION PRELIMINAIRE DES TOURBIERES	11
1.3. L'APPROCHE TYPOLOGIQUE	11
1.3.1. Définition	11
1.3.2. Application pratique	15
1.4. METHODE D'ANALYSE DES DONNEES	17
1.4.1. Analyse statistique simple	17
1.4.2. Analyse multivariable	17
2. RESULTATS	21
2.1. RESULTATS GENERAUX	21
2.2. L'IMPORTANCE DES DESCRIPTEURS TYPOLOGIQUES	25
2.2.1. Statistique générale	25
2.2.2. Analyse multivariable	27
3. DISCUSSION	37
3.1. LES SYSTEMES TERRESTRES	39
3.1.1. La série des géophytes cespiteux (touradons)	43
3.1.2. La série des gazons de mousses	43
3.2. LES CREUSES	43
4. CONCLUSION	47

2^{ème} partie: DESCRIPTION DES SERIES EVOLUTIVES

INTRODUCTION	51
1. METHODOLOGIE	55
1.1. INTRODUCTION	55
1.2. METHODES D'ETUDES DE LA VEGETATION	55
1.2.1. La végétation liée au profil pédologique	55
1.2.2. Description structurelle au moyen de placettes détaillées	55
1.2.3. Les transects	57
1.3. METHODES D'ETUDE DES SOLS	59
1.3.1. Description des sols et prélèvements des échantillons	59
1.3.2. Analyses physico-chimiques des tourbes	61
1.3.3. Degré de compaction du sol	63
1.3.4. Analyses des macrofossiles	63

1.4. METHODE D'ETUDE DE L'EAU DU SOL.....	67
1.4.1. Dynamique des nappes.....	67
1.5. METHODE D'ETUDE DU CLIMAT.....	69
1.5.1. Précipitations atmosphériques.....	71
1.5.2. Température et humidité de l'air.....	73
1.5.3. Température du sol.....	73
1.5.4. Evaporation.....	73
1.5.5. Vitesse du vent.....	73
1.6. METHODE D'ETUDE DE LA CROISSANCE DES SPHAIGNES.....	75
1.7. METHODE D'ANALYSES DES RESULTATS.....	77
2. DESCRIPTION DES SERIES.....	77
2.1. SERIE DES TOURADONS.....	77
2.2. SERIE DES GAZONS DE MOUSSES.....	79
2.3. SERIE DES MARAIS TREMBLANTS.....	79
2.4. CHOIX DES SITES D'ETUDES.....	81
2.4.1. Introduction.....	81
2.4.2. Le site des Pontins.....	83
2.4.3. Le site de La Chaux-d'Abel.....	83
2.4.4. Le site de Martel-Dernier.....	85
2.4.5. Le site du Cachot.....	85
2.4.6. Le site de Bellelay.....	87
3. DESCRIPTION DE LA VEGETATION ETUDIEE.....	89
INTRODUCTION.....	89
3.1. METHODE.....	89
3.2. LA SERIE DES TOURADONS (<i>Eriophorum vaginatum</i>).....	89
3.2.1. La structure verticale de la végétation liée au profil pédologique.....	89
3.2.2. La structure horizontale de la végétation.....	93
3.2.3. Caractéristiques végétales de la série.....	93
3.3. LA SERIE DES GAZONS DE MOUSSES (<i>Polytrichum strictum</i>).....	95
3.3.1. La structure verticale de la végétation liée au profil pédologique.....	95
3.3.2. La structure horizontale de la végétation.....	97
3.3.3. Caractéristiques végétales de la série.....	97
3.4. LA SERIE DES MARAIS TREMBLANTS.....	99
3.4.1. La structure verticale de la végétation liée au profil de tourbe.....	99
3.4.2. La structure horizontale de la végétation.....	103
3.4.3. Les transects de végétation.....	103
3.4.4. Caractéristiques végétales de la série.....	113
3.5. SYNTHESE ET CONCLUSION.....	113
4. PEDOLOGIE.....	117
INTRODUCTION.....	117
4.1. METHODE.....	117
4.2. DESCRIPTION CLASSIQUE DES SOLS ET TYPOLOGIE.....	117
4.2.1. Introduction.....	117
4.2.2. Caractéristiques générales des sols.....	119
4.2.3. Remarques sur les sols décrits.....	121
4.2.4. Description des profils.....	121
4.2.4.1. Série des touradons, stade 1, Les Pontins.....	121
4.2.4.2. Série des touradons, stade 2, La Chaux-d'Abel.....	127

4.2.4.3.	Série des touradons, stade 3, La Chaux-d'Abel	131
4.2.4.4.	Série des touradons, stade 4, La Chaux-d'Abel	135
4.2.4.5.	Série des gazons de mousses, stade 1, Martel-Dernier	139
4.2.4.6.	Série des gazons de mousses, stade 2, Le Cachot	145
4.2.4.7.	Série des gazons de mousses, stade 3, Le Cachot	149
4.2.4.8.	Série des gazons de mousses, stade 4, Le Cachot	151
4.2.4.9.	Série des marais tremblants, stade 1, Bellelay	155
4.2.4.10.	Série des marais tremblants, stade 2, Bellelay	159
4.2.4.11.	Série des marais tremblants, stade 3, Bellelay	161
4.2.4.12.	Série des marais tremblants, stade 4, Bellelay	165
4.3.	ANALYSE STRATIGRAPHIQUE PAR LA DETERMINATION DES MACROFOSSILES	167
4.3.1.	Méthode	167
4.3.2.	Résultats	169
4.4.	CLASSIFICATION DES TOURBES	173
4.4.1.	Introduction	173
4.4.2.	Classification basée sur la composition granulométrique des tourbes	177
4.4.2.1.	Méthode	177
4.4.2.2.	Classification	181
4.4.3.	Degré de décomposition des tourbes	183
4.4.3.1.	Relations taux de fibres-indice pyro	183
4.4.3.2.	Rapport Ca/Mg	185
4.4.4.	Le rapport atomique de H/C	189
4.4.5.	Corrélations linéaires simples entre paramètres	195
4.5.	ANALYSES MULTIVARIABLES DES SOLS	199
4.5.1.	Introduction	199
4.5.2.	L'ACP globale	201
4.5.3.	L'ACP partielle limitée aux 5 paramètres de base	205
4.5.4.	L'ACP partielle limitée aux échantillons intégrant les mesures de porosité	207
4.6.	CONCLUSION	209
5.	HYDRODYNAMIQUE	213
	INTRODUCTION	213
5.1.	METHODE	215
5.2.	CARACTERISATION DES CONDITIONS HYDRIQUES DES SOLS	217
5.2.1.	Généralités	217
5.2.2.	Série des touradons	219
5.2.2.1.	Les variations saisonnières du niveau de la nappe	219
5.2.2.2.	Les courbes de dépassement permanent de la nappe	221
5.2.2.3.	Les variations saisonnières de la succion	223
5.2.2.4.	Les courbes de dépassement permanent pour la succion	225
5.2.3.	Série des gazons de mousses	225
5.2.3.1.	Les variations saisonnières de la nappe	227
5.2.3.2.	Les variations saisonnières de la succion	227
5.2.4.	Série des marais tremblants	229
5.2.4.1.	Les variations saisonnières de la nappe	229
5.2.4.2.	Les courbes de dépassement permanent de la nappe	231
5.2.4.3.	Les variations saisonnières de la succion	231
5.2.5.	Discussions et classification	233

6. CLIMATOLOGIE	237
6.1. CARACTERISTIQUES GENERALES DU CLIMAT EN 1991	237
6.1.1. Introduction.....	237
6.1.2. Méthode.....	239
6.1.3. Résultats généraux.....	239
6.1.3.1. Les précipitations atmosphériques.....	239
6.1.3.2. La température.....	243
6.1.3.3. L'humidité.....	243
6.2. CARACTERISTIQUES MICROCLIMATOLOGIQUES.....	243
6.2.1. Introduction.....	243
6.2.2. Méthodes spécifiques.....	247
6.2.3. Description des sites étudiés.....	247
6.2.4. Caractéristiques microclimatologiques générales.....	249
6.2.4.1. Les surfaces de tourbe nue (stade 1 des séries terrestres).....	249
6.2.4.2. La jeune butte à sphaignes (stade 4 de la série des gazons de mousses).....	253
6.2.4.3. Le tapis de sphaignes du marais tremblant (stades 1 et 2).....	253
6.2.4.4. Comparaison avec la littérature.....	255
6.2.5. Caractéristiques microclimatologiques des touradons et influences des coussinets de sphaignes régénérés.....	255
6.2.5.1. En absence de sphaigne.....	257
6.2.5.2. En présence de sphaignes.....	261
6.2.6. Caractéristiques microclimatologiques des gazons muscinaux à <i>Polytrichum strictum</i>	263
6.2.7. Approches microclimatologiques des couverts de chaméphytes et des structures boisées.....	267
6.2.8. Synthèse et discussion.....	269
7. PRODUCTION PRIMAIRE DES SPHAIGNES SUR LE TERRAIN	279
INTRODUCTION.....	279
7.1. METHODE.....	279
7.2. RESULTATS.....	279
7.2.1. Les mesures de croissance de 1991.....	279
7.2.2. Les mesures de croissance de 1992.....	281
7.3. DISCUSSION ET CONCLUSION.....	285
8. SYNTHÈSE DES RESULTATS	289
INTRODUCTION.....	289
8.1. LA NOTION DE SUCCESSION ADAPTEE AUX SERIES EVOLUTIVES DECRIRES.....	291
8.1.1. Définitions et généralités.....	291
8.1.2. L'approche successioneille liée à la régénération des hauts-marais jurassiens.....	297
8.1.2.1. Introduction.....	297
8.1.2.2. Validation de la notion de succession sur la base du modèle de ODUM (1969).....	299
8.1.3. Discussion et conclusion.....	301

8.2. COMPLEXE ECOLOGIQUE OPTIMAL POUR INITIER LA REGENERATION.....	305
8.2.1. Environnement géomorphologique et histoire des exploitations.....	305
8.2.2. Influence des conditions spécifiques aux sites sur la dynamique secondaire.....	307
8.2.2.1. La régénération en milieux terrestres.....	307
8.2.2.2. La régénération en milieu aquatique.....	313
8.3. POSSIBILITE ET LIMITE DE LA GESTION DES SUCCESSIONS SECONDAIRES OU: COMMENT FAVORISER LA REGENERATION ?.....	315
8.3.1. La gestion des milieux secondaires.....	315
8.3.2. Propositions de recherches futures.....	319
 BIBLIOGRAPHIE.....	 323
 ANNEXES.....	 335

En hommage au
professeur
Sylvain Bruckert

AVANT-PROPOS

Ce travail s'inscrit dans la ligne de "l'école naturaliste" tracée et maintenue par les laboratoires d'Ecologie de l'Université de Neuchâtel.

Nous avons volontairement abordé le sujet de la dynamique secondaire de la régénération des hauts-marais jurassiens par une approche généraliste et multidisciplinaire.

Conscient que chaque chapitre spécifique ne permet pas au spécialiste de trouver l'entière satisfaction que lui dicte sa rigueur scientifique, nous espérons néanmoins vivement qu'une lecture complète permette de mettre en exergue les mécanismes globaux qui conditionnent les phases initiales de la régénération des tourbières de l'Arc jurassien.

RESUME

L'étude de la dynamique de la régénération est pluridisciplinaire et a été entreprise dans le but de comprendre les conditions écologiques permettant la réapparition spontanée des sphaignes dans les premières phases des successions végétales secondaires observées dans les tourbières du Jura. Cette étude est constituée de deux parties distinctes:

Dans la première partie, nous avons parcouru le maximum des sites potentiels du Jura dans le but de recenser et de caractériser l'ensemble des types de régénération observables à ce jour. L'investigation a été limitée aux milieux ouverts en séparant les stations recensées en trois catégories dès l'observation de terrain. C'est ainsi que nous avons distingué:

- les creuses, localisées dans les fosses d'exploitation,
- les mosaïques végétales, lorsque les sphaignes couvrent le sol en petites plages indépendantes dans une végétation compagne homogène et
- les tapis continus de sphaignes.

Chaque catégorie comporte six descripteurs typologiques en commun alors que trois autres descripteurs distinguent les creuses et les mosaïques.

Les résultats montrent que la régénération en milieu ouvert ne couvre que 25% des surfaces secondaires favorables du Jura et que l'échantillonnage typologique est très pauvre par rapport aux types potentiels. L'analyse des données permet de mettre en évidence une hiérarchisation des descripteurs et une nette homologie des trois catégories.

L'analyse automatique menée sur les descripteurs met en évidence trois systèmes évolutifs menant des milieux encore très pionniers, avec des surfaces de tourbe nue ou d'eau libre, à des milieux secondaires structurés avec une couverture sphagnale totale, des buttes à sphaignes et une couverture chaméphytique importante. Les deux catégories terrestres apparaissent alors comme liées et illustratrices de phases évolutives d'une dynamique conduisant à une fermeture végétale totale. Dès lors nous pouvons mettre en évidence trois séries dynamiques principales selon la structure végétale et le mode de colonisation des espèces pionnières:

La série des touradons (avec principalement *Eriophorum vaginatum*)

La série des gazon de mousses (avec principalement *Polytrichum strictum*)

La série des marais tremblants (caractérisée par les groupements du *Caricion lasiocarpae*)

La deuxième partie du travail concerne l'étude pluridisciplinaire détaillée de ces trois séries évolutives, par une approche synchronique. Quatre stades ont été choisis pour montrer la convergence évolutive vers le *Sphagnion magellanici* qui apparaît comme le groupement clef de la cicatrisation végétale secondaire des marais jurassiens et le groupement final de la première phase des successions secondaires qui caractérisent la régénération.

Suite à une description végétale détaillée, avec étude des structures par des projections planes et des transects linéaires pour les marais tremblants, les recherches ont été conduites en pédologie, hydrodynamique et micrométéorologie. Pour l'approche pédologique, un complément important sur la composition botanique de la tourbe en profondeur est étudié afin de mettre en évidence les relations entre la végétation actuelle et la composition de la tourbe. Cette approche est principalement importante pour la série des marais tremblants où les interactions entre ancienne tourbe et néoformation sont possibles par les mouvements de l'eau d'écoulement.

Les résultats **pédologiques** montrent que la régénération est possible malgré une assez forte décomposition physico-chimique et sur des sols d'une épaisseur très variable (de quelques décimètres à quelques mètres de tourbe). La tourbe présente une différence entre la vitesse de décomposition chimique et de dégradation physique. En règle générale, le taux de fibres reste assez élevé par la présence des racines de la nouvelle végétation. Ces racines ont une influence sur la gestion de l'eau et la capacité d'écoulement des pluies vers la profondeur en relation avec les modifications de la densité du sol. Liée à cette densification du sol, une légère imperméabilisation de la tourbe est décelée, diminuant la vitesse d'écoulement. L'eau de pluie est ainsi retenue en surface plus longtemps ce qui permet de favoriser la cicatrisation végétale et la croissance des sphaignes.

L'**hydrodynamique** montre une absence de nappe permanente pour les profils de la série des touradons alors que pour la série des gazons muscinaux, une nappe est présente en permanence en profondeur. Les résultats piézométriques et tensiométriques mettent en évidence une convergence des types de nappes par des fluctuations saisonnières et des courbes de dépassement permanent identiques.

Le rôle écologique prépondérant du facteur micrométéorologique est mis en évidence dans les phases initiales des successions végétales et lors de l'apparition des sphaignes parmi la végétation pionnière. Ainsi, c'est la structure du milieu, induite par les stratégies de croissance des espèces pionnières, qui provoque les modifications microclimatologiques les plus nettes et les plus favorables aux sphaignes. Grâce à ces nouvelles conditions, les sphaignes peuvent non seulement s'implanter sur la tourbe dénudée mais également se développer suffisamment pour que leur pouvoir régulateur sur le milieu (maintien de l'eau de pluie) leur assure un auto-fonctionnement et la recréation d'un milieu caractéristique: le *Sphagnion magellanicum*.

La synthèse porte sur la critique de la notion de **succession** et la recherche d'un modèle caractérisant le mieux possible les trois séries évolutives décrites. La comparaison de nos trois séries avec quelques modèles successionnels proposés dans la littérature, en particulier celui de ODUM (1969) permet de montrer que les caractéristiques des stades de chaque série répondent assez bien aux conditions posées pour la validation de la notion de succession. P. ex. la productivité primaire diminue alors que la diversité augmente, tout comme la taille de l'organisme considéré. L'homéostasie générale évolue en indiquant une diminution des influences externes sur l'équilibre fonctionnel du milieu régénéré. Ces considérations nous amènent à formuler un critère de reconnaissance pour qualifier la réussite des premières phases de la régénération: **L'évolution doit permettre la reconstitution d'une phytocénose secondaire apparentée à l'alliance du *Sphagnion magellanicum***, celui-ci étant l'expression de l'évolution convergente des divers milieux pionniers.

Des considérations quant aux propositions pratiques pouvant être formulées dans les **plans de gestion** sont abordées. Il apparaît dès lors comme primordial de centrer les propositions de travaux de gestion en focalisant les analyses de base sur les conditions mésoclimatiques et microclimatiques. L'évaluation du mésoclimat permet de replacer la tourbière dans son contexte géomorphologique et d'estimer son influence actuelle sur le contrôle climatique de la vallée où elle se trouve (importance des inversions thermiques journalières, fréquence et taux de saturation des brouillards nocturnes). Si la tourbière est trop réduite et perturbée et qu'elle ne permet plus de créer presque chaque jour ces conditions particulières, il est fortement illusoire d'envisager une réelle régénération par les sphaignes. En cas de gestion favorable, le contrôle microclimatique est certainement l'aménagement le plus simple à viser. Plutôt que de construire des "abris à sphaignes", nous proposons de favoriser l'installation des espèces végétales pionnières afin de

recréer la structure la plus favorable possible (implantation et accélération de la croissance d'*Eriophorum vaginatum*).

Nous terminerons par indiquer que, de toute manière, avec ou sans gestion humaine, le **facteur "temps"** est primordial dans la prise en compte de la réussite de la régénération des hauts-marais et que même si l'homme intervient dans le processus dynamique, il doit conserver à l'esprit qu'une tourbière évolue et se modifie à une échelle millénaire, et que le but à viser pour juger de la réussite ou de l'échec de la régénération dépasse largement le cycle vital du gestionnaire ou du politicien. Dès lors, la première urgence reste de stopper définitivement les blessures portées si l'on veut espérer une guérison de l'écosystème global.

REMERCIEMENTS

Le sujet développé dans le cadre de cette recherche n'est en aucun cas totalement original. L'importance de la bibliographie en témoigne. J'adresse donc ici mes remerciements à tous les autres passionnés des marais, dont les réflexions et les nombreux travaux m'ont permis une critique constructive et dynamisante lors de cette recherche et la rédaction de ce mémoire. De plus, la réussite de cette étude est le fruit d'un travail collectif, mené par deux doctorants et une petite équipe du Laboratoire d'écologie végétale de l'Université de Neuchâtel.

Parmi ces passionnés des tourbières, mes premiers remerciements vont au professeur Jean-Michel Gobat, instigateur et directeur de ce projet de recherche. Tout au long de ce travail, il a admirablement réussi à diriger l'équipe de recherche en orientant avec à propos les choix inhérents aux études pluridisciplinaires. En phase d'interprétation et de rédaction, j'ai particulièrement apprécié ses critiques constructives et stimulantes ainsi que ses suggestions d'améliorations amicalement présentées sous forme de remarques souvent drôles et de clichés "*bédé-istes*".

Ma gratitude va également à Alexandre Buttler, responsable de l'équipe de recherche, qui a pu, malgré son emploi du temps très chargé, trouver l'énergie et le temps de suivre le groupe de travail et de la dynamiser par des conseils critiques autant sur le terrain, qu'au laboratoire et qu'en phase de rédaction.

Je remercie vivement les membres du jury de thèse qui, par leurs critiques averties des résultats et leurs remarques constructives, m'encouragent à lancer des interventions pratiques sur le terrain pour tester les principes de régénération et tenter d'améliorer la qualité des hauts-marais:

Le professeur Jean-Michel Gobat, du laboratoire d'Ecologie végétale et de phytosociologie de l'Université de Neuchâtel, directeur de thèse.

Feu le professeur Sylvain Bruckert, de l'Université de Franche-Comté à Besançon (France), hospitalisé peu avant l'examen et décédé quelques temps après, à qui j'adresse ici, à titre posthume, un hommage et des remerciements particuliers pour la critique enthousiaste et positive du manuscrit.

Ph. D. Henri Diné, du Ministère de l'Agriculture à Ottawa (Canada).

Dr. Willy Geiger, de l'Institut de zoologie de l'Université de Neuchâtel.

Dr. Alexandre Buttler, de l'Institut de botanique de l'Université de Neuchâtel.

Dr. Michèle Gaiffe de l'Université de Franche-Comté à Besançon (France) qui a remplacé le professeur Bruckert et participé activement à l'examen malgré la douleur du moment.

Toute formulation écrite est incomplète pour exprimer les relations de travail étroites et enthousiasmantes, les aides réciproques non calculées, les discussions autant drôles que critiques, les longues journées de terrain que j'ai eues avec Philippe Grosvernier tout au long de cette tranche de vie autour et dans les fosses pédologiques et les creuses expérimentales de Bellelay. Merci beaucoup Linus !

Ce travail de thèse n'aurait jamais été totalement concrétisé sans l'excellente ambiance que mes collègues et amis du bureau Ecoconseil, Gilles, Christophe, Jean-Paul, Pierre-Alain, Dominique, Pascal et Corinne, m'ont offerte tout au long de la phase expérimentale. Mes remerciements sont encore plus chaleureux pour l'année rédactionnelle 1992, pendant laquelle j'ai bénéficié d'un long semestre sabbatique malgré les travaux et charges administratives à mener à bien.

Je remercie également Jean-Daniel Gallandat, professeur associé au Laboratoire de phytosociologie et d'écologie végétale de l'Université de Neuchâtel, pour avoir précieusement conseillé l'équipe dans les choix des critères typologiques.

Ma gratitude va aussi à Lidia, Aurélie, Manon et Catherine, les laborantines du Laboratoire d'écologie végétale pour les nombreuses analyses effectuées ainsi qu'à Romain pour son aide au laboratoire et à Béatrice pour son doigté dans la manipulation des sphaignes.

L'accessibilité des traitements de texte performant en micro-informatique m'a permis de rédiger "à l'écran" et de taper le texte en direct. Ce procédé a fait deux sympathiques victimes puisque Dominique, habile secrétaire, a plus participé comme "photocopieuse" et Jean-Michel qui, comme premier lecteur critique, a constaté mes limites orthographiques et dactylographiques. Je vous remercie sincèrement tous les deux de vos efforts.

Je souhaite encore ici apporter mes remerciements aux personnes suivantes:

- MM. J.-P. Dubois et J.-D. Teuscher, du Laboratoire de pédologie de l'EPFL pour les discussions que nous avons eues et l'efficacité lors des analyses chimiques.
- L'équipe du Lasur de l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel, en particulier Carlos et Isabelle, pour les analyses effectuées.
- M. le Prof. M. Aragno et ses collègues du Laboratoire de microbiologie de l'Université de Neuchâtel pour la mise à disposition de locaux et d'appareillage de laboratoire.
- M. le Prof. K. Bernauer, de l'Institut de Chimie de l'Université de Neuchâtel pour la mise à disposition d'instruments de mesure.
- M. le Prof. W. Matthey, du Laboratoire d'écologie animale de l'Université de Neuchâtel pour son amicale disponibilité et ses conseils lors de discussions sur la tourbière du Cachot, ainsi que pour l'ouverture de sa bibliothèque personnelle et l'accès à de nombreux articles.
- L'équipe du Jardin botanique de l'Université de Neuchâtel pour l'aide précieuse lors de la mise en place et du suivi des expériences dans notre mini serre.
- M. A. Grünig, du Centre de coordination pour les marais de Birmensdorf pour les très nombreuses données bibliographiques et les articles photocopiés.
- M. G. Boss, de la Bibliothèque de l'Université de Neuchâtel, pour la commande de livres et d'articles.
- Le Service de prêt interbibliothèque de la Bibliothèque de la Ville de La Chaux-de-Fonds, et en particulier G. Taillard et N. Matthey.
- M. M. Rosset, de l'Institut de Botanique de l'Université de Berne pour ses conseils et son expérience pratique en micrométéorologie.
- M. A. Collaud, de l'Institut de Zoologie de l'Université de Neuchâtel, pour son aide dans la construction et la mise au point de l'important matériel utilisé dans la serre et sur le terrain.
- Mes amis Philippe et Marie-Françoise pour leur accueil au Crêt-du-Loche et l'ambiance que nous avons pu partagée tout au long de cette folle année 1992.

Je tiens de plus à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin et bien que restant anonyme ici, ont participé à ce travail de recherche.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans réserver la place de choix à Nicole, mon épouse, à Joanie et Ludovic et à mes parents qui m'ont admirablement soutenu tout au long de cette aventure.

INTRODUCTION GENERALE

1. INTERET DE LA REGENERATION

La très grande valeur biologique des hauts-marais n'est plus à démontrer, ni leur originalité dans les paysages suisses et jurassiens. L'"Inventaire des hauts-marais et marais de transition" de Suisse (GRUENIG *et al.* 1986) a montré toute l'importance de ces écosystèmes, refuges de plantes, de groupements végétaux et d'animaux très rares, voir uniques sous nos latitudes.

Outre les connaissances scientifiques accumulées depuis de nombreuses années, une prise de conscience politique s'est fait jour ces derniers temps. La grande sensibilité de ces milieux face aux multiples atteintes externes sont reconnues et des mesures de protection commencent à être mises en place concrètement.

Il est toutefois indispensable actuellement d'aller au delà d'une simple "mise en réserve". Il est important de pouvoir proposer l'établissement de véritables plans de gestion des hauts-marais tenant compte de l'ensemble des intérêts en présence et fondés sur des arguments scientifiques solides.

Un des aspects essentiels de tels plans de gestion est celui de permettre la régénération de la tourbière pour favoriser la cicatrisation des milieux, suite aux nombreuses atteintes anthropiques.

Nous avons dès lors orienté notre projet de recherches sur l'étude écologique des phases initiales de la régénération. Une telle approche concerne de nombreuses disciplines scientifiques afin de permettre de cerner la globalité du phénomène dynamique. Vu les innombrables interrelations entre disciplines, il nous est apparu dès la mise en place du projet qu'une approche écosystémique était indispensable pour aborder correctement le sujet.

2. OBJECTIFS ET ORGANISATION DE LA RECHERCHE

La problématique de la régénération des tourbières n'est pas nouvelle, en particulier en Allemagne et en Hollande où de très vastes surfaces de marais ont été mises à nu et totalement détruites par les exploitations de tourbe. Par les publications nombreuses sur le sujet, il nous semble que la problématique est assez fortement différente de la nôtre. Les vastes étendues ainsi que la nature initiale des marais (marais plat) provoquent une volonté de mise en valeur agricole encore plus importante que chez nous. L'intérêt de la mise sous protection et de la régénération existe mais suscite des débats quant aux vocations, aux buts et aux moyens à mettre en place (WHITE 1930, SCHMEIDL 1972, KUNTZE 1973, TUEXEN 1974, 1976, VON DER SAHL 1975, DIETZ 1978, SMATZLER & TUEXEN 1980, MUELLER 1980, RINGLER 1989, JORTAY & SCHUMACKER 1989, PFADENHAUER, 1989). Un vaste programme de travaux pratiques pour initier la régénération et de suivis scientifiques a été mis sur pied en 1982 dans la région allemande du "Hohe Rhön" sur le site du "Rotes Moor" près de Fulda. Un cahier spécial de la revue TELMA de Hanovre a été consacré à ce programme en 1989 (Beiheft 2) pour présenter les projets techniques de barrages, d'aménagements et les premiers résultats du suivi scientifique.

En Suisse, l'approche de la régénération la plus connue est celle de SCHNEEBELI abordée sous l'angle du fonctionnement hydrologique et de la modélisation des écoulements (SCHNEEBELI & PFEIFFER 1983, SCHNEEBELI 1988, 1989, 1991, SCHNEEBELI & FLUEHLER 1991).

Pour notre part, nous avons abordé la régénération sous l'angle de la reprise de la formation de tourbe après une modification de l'état naturel par une action humaine. Il s'agit donc d'un processus secondaire. Le programme de recherches complet vise à confirmer l'hypothèse

... d'un lien entre le potentiel et la vitesse de régénération, sous certaines conditions initiales variées ayant trait aux types d'actions humaines, aux conditions physico-chimiques ambiantes et au degré d'hydromorphie. En particulier, le rôle des caractéristiques micrométéorologiques sera abordé en détail.

Vu le laps de temps court à disposition, nous avons limité la recherche aux phases initiales de la régénération qui peuvent montrer des réponses significatives dans ces délais vu la rapidité d'évolution. Le programme a été séparé en deux volets distincts et totalement complémentaires.

L'approche fine de la **dynamique de la croissance** des sphaignes en conditions contrôlées (serre de culture) et sur le terrain a été menée par Philippe GROSVERNIER et traitée dans un mémoire séparé (GROSVERNIER, 1996).

Pour notre part, nous avons abordé et étudié l'approche de la **dynamique de la régénération** par un inventaire typologique des milieux en régénération du Jura (première partie du travail) puis par l'étude pluridisciplinaire (végétation, pédologie, hydrodynamique et micrométéorologie) de trois séries évolutives montrant une convergence vers le *Sphagnion magellanicum* à partir de situations secondaires très diverses (deuxième partie):

- vaste surface de tourbe nue
- bordure immédiate des murs d'exploitation
- fosses d'exploitation inondées.

Outre l'accumulation de données scientifiques sur l'écologie des types de régénération, le programme complet vise l'obtention des bases scientifiques pour l'élaboration des plans de gestion. La mise en place d'essais pratiques sur des sites choisis n'a pu être que partiellement concrétisée en parallèle aux phases de recherches. Nous espérons vivement que ce volet pourra trouver un écho favorable rapidement dans des projets complémentaires afin de tester à l'échelle 1:1 les concepts et propositions formulés.

Première partie

TYPOLOGIE

INTRODUCTION

Avertissement: Le tableau 2 est manquant. Il ne s'agit pas d'une erreur d'impression mais d'une recomposition des données suite à des modifications sollicitées par le jury.

Les recherches scientifiques sur les hauts-marais jurassiens sont nombreuses. Les principales concernent des approches phytosociologiques ou faunistiques, ou présentent des orientations relatives à la protection des sites, à l'hydrologie et à la pédologie.

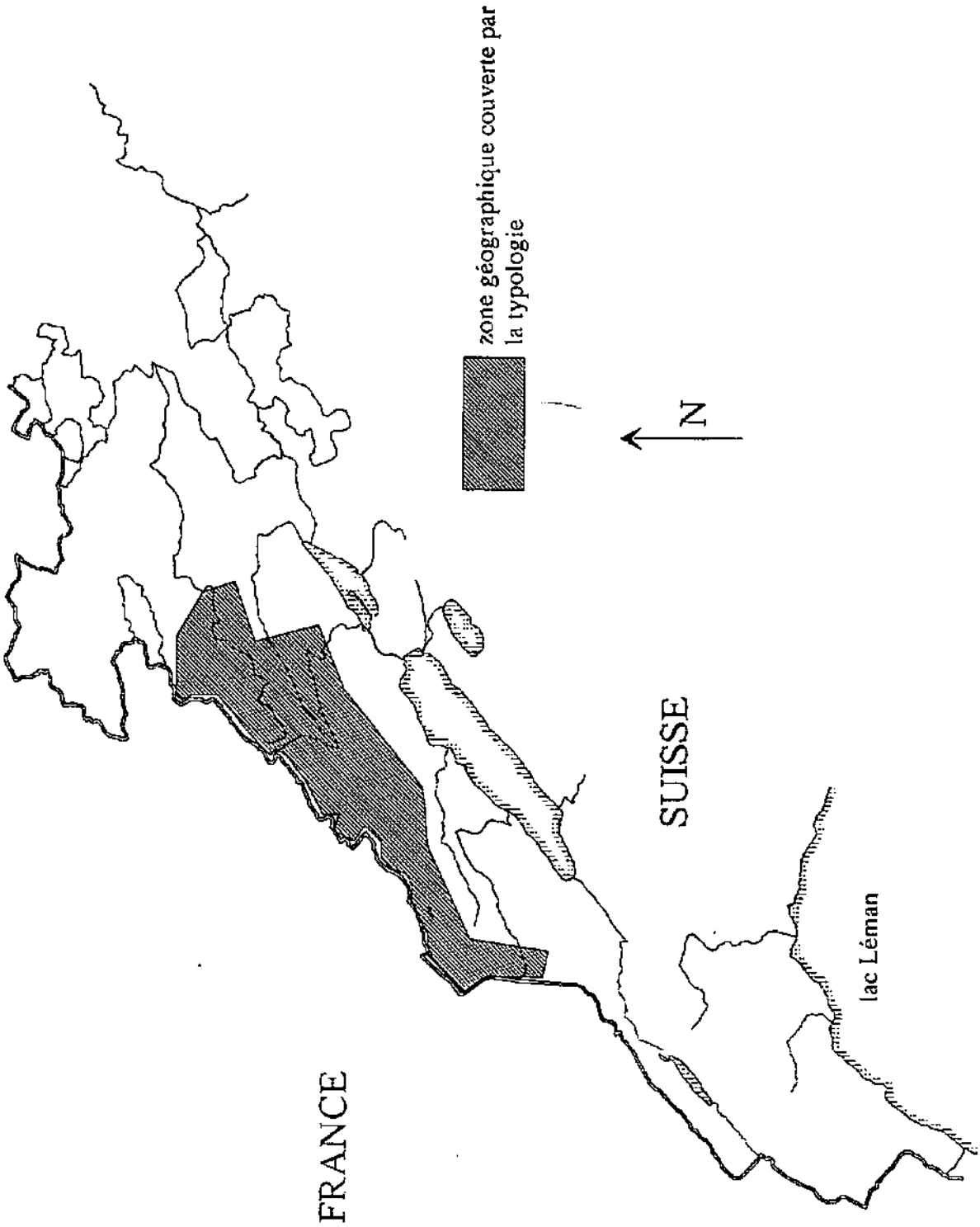
La flore et la végétation des tourbières du Jura ont fait l'objet de multiples travaux (SPINNER 1932, ISCHER 1935, JORAY 1942, CHASTAIN 1952, RICHARD 1961, GALLANDAT 1982, BUTTLER & CORNALI 1983, MATTHEY Y. 1984, 1986, FELDMAYER-CHRISTE 1987, 1990). Outre ces documents publiés, de nombreux rapports universitaires (licences et diplômes) et privés orientés vers la cartographie de la végétation mais également vers l'approche des milieux secondaires leur ont été consacrés.

Les problèmes posés actuellement par la mise sous protection des hauts-marais, la gestion des milieux perturbés, la régénération des surfaces exploitées montrent les limites de l'approche phytosociologique classique dans la délimitation d'objectifs clairs et de diagnostics. Afin de pallier ce manque, et pour couvrir rapidement les surfaces importantes à prendre en considération, l'approche des milieux se fait par des typologies adaptées aux objectifs spécifiques.

Les principaux travaux sur les classifications concernent les types de marais eux-mêmes. Pour l'Angleterre, LINDSAY *et al.* (1988) font un bilan très complet des différentes orientations données à ces classifications (géomorphologie, ontogenèse, couverture végétale, paléobotanique, relations eau et sol, chimisme de la tourbe). Les références de nombreux travaux y sont cités. Nous ne les reprendrons pas ici. Concernant également la classification des marais, les Canadiens ont analysé et détaillé diverses classifications, en particulier ZOLTAI *et al.* (1973) et plus récemment ZOLTAI & POLLET (1983) et WELLS & ZOLTAI (1985). En Allemagne également, les classifications sont nombreuses. Elles se basent principalement sur les méthodes d'évaluation de la valeur de protection (KAULE 1976, TUEXEN 1979). De plus, MEYER (1990) tient compte des capacités de régénération des marais dans sa méthode d'évaluation. En Pologne, OKRUSKO (1980) base une classification sur l'origine du matériel pédologique initiant la formation du marais. STEINER (1985), en Autriche s'est également intéressé à la classification des marais lors de l'inventaire national. Une classification typologique est proposée par MALMER (1985) pour la Scandinavie alors que DIERSSEN & DIERSSEN (1985) ainsi que RYBNICEK (1985) élaborent des classifications basées sur la valeur de la végétation au moyen de l'approche phytosociologique classique et ce, pour l'Europe Centrale et la Scandinavie.

Plus généralement, il faut encore citer l'importance de la mise au point de typologies et de terminologies internationales comme le montre la tenue à Glasgow, en 1976 déjà, d'un symposium sur la classification des marais et de la tourbe par l'IGMT (Internationalen Gesellschaft für Moor und Torfkunde) et d'une journée de cette même société sur la classification des tourbes, tenue en Finlande en automne 1979. Plus récemment, la classification des sols tourbeux a fait l'objet d'une révision complète lors de la refonte du Référentiel Pédologique des sols d'Europe (AFES, 1992). Pour la Suisse, l'inventaire national mené par l'équipe de KOSMOS (GRUENIG *et al.*, 1986) se base sur une typologie végétale et structurelle des marais (état de conservation des sites) dans le but de

Figure 1: Couverture géographique de la typologie



classer les objets par degré d'importance et d'orienter la stratégie de mise sous protection. Afin de mieux répondre à cet objectif, il a été nécessaire, dans le cadre des tourbières jurassiennes, de détailler l'approche typologique des groupements végétaux en intégrant les atteintes portées aux milieux et les réponses de ces derniers (dégradations ou régénération) (GOBAT *et al.* 1986, MULHAUSER *et al.* 1992).

Fort de ces expériences et sur la base des nombreuses visites effectuées sur les hauts-marais jurassiens, nous avons estimé que l'approche écologique des conditions initiales permettant une régénération devait être définie après analyse d'un inventaire aussi complet que possible des catégories et des types de régénération.

Considérant l'histoire récente assez identique de la majorité des hauts-marais du Jura (exploitation jusqu'en 1945 puis abandon de vastes surfaces), l'évolution de ces zones en 45 ans doit offrir à la fois une multitude de faciès propres aux conditions locales et des réponses convergentes. Les buts de cet inventaire typologique des milieux en régénération du Jura sont de localiser et de caractériser ces surfaces pour chaque site, de mettre en évidence d'éventuelles constantes, des séries évolutives ou diverses étapes de la dynamique végétale secondaire sur ces marais.

Cet inventaire doit permettre non seulement de donner les bases pour l'étude écologique détaillée des conditions initiales de la régénération mais également fournir une image statistique aussi complète que possible de ces zones pour les tourbières du Jura. La figure 1 illustre la zone géographique couverte à travers l'Arc jurassien.

1. METHODOLOGIE

1.1. DEFINITION

Notre approche typologique est basée sur un inventaire aussi exhaustif que possible des stations en régénération rencontrées sur les tourbières secondaires non boisées du Jura suisse. La figure 2 illustre l'organisation de cet inventaire et donne les définitions des termes utilisés.

1° La station doit être localisée sur une surface de haut-marais secondaire, c'est-à-dire ayant été directement modifiée par des activités humaines. En particulier, la couverture végétale doit avoir été totalement éliminée, par râclage de la tourbe. L'élimination de tourbe (diminution de son épaisseur) n'est pas obligatoire.

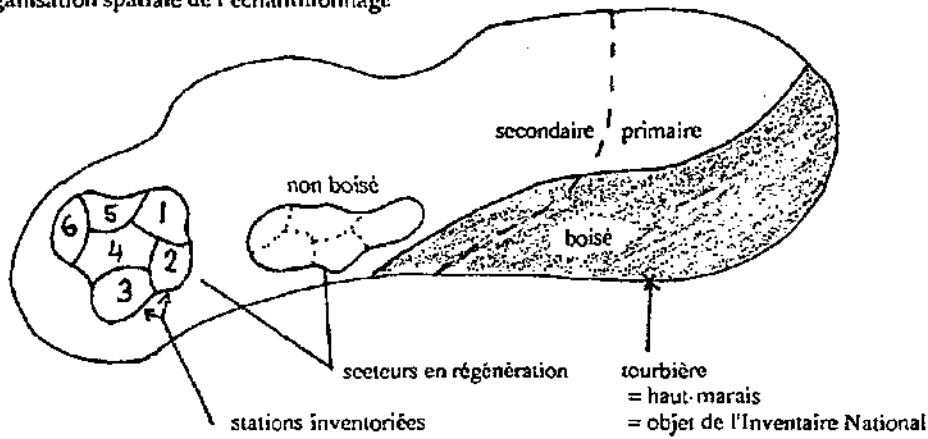
2° Il ne suffit pas que la surface ait retrouvé une couverture végétale (cicatrisation), il faut que les conditions locales aient assuré une recolonisation du site par des sphaignes formant des coussinets ou des tapis par développement végétatif d'éléments en place ou par "implantations" externes.

De plus, pour garantir des situations comparables quant au degré de complexité fonctionnel, notamment en ce qui concerne les facteurs biotiques et afin de cibler au mieux les conditions initiales de l'apparition des sphaignes, nous avons limité notre approche aux seuls milieux ouverts (moins de 25% de recouvrement des arbres, sauf dans le cas de la catégorie des creuses pour ne pas

Figure 2

Définition des termes utilisés pour la typologie

Organisation spatiale de l'échantillonnage



Organisation descriptive

3 catégories = 3 classes de descripteurs 9 descripteurs critères = valeurs des descripteurs exemple d'un type (classe des mosaïques)

T a p i s e	C r e u s e	M	D8: tourbe nue	A ou B	A
		o	D9: végétation	A à F	D
		s	D1: localisation	A ou B ou C	B
		a	D2: chaméphytes	A ou B	A
		i	D3: buttes	A ou B	A
		q	D4: niveau hydrique	A ou B ou C	C
		u	D5: épaisseur de la tourbe	A ou B ou C	C
		e	D6: stabilité du sol	A ou B ou C	B
		s	D7: arbres	A ou B	

Définition des termes utilisés A ou B = qualitatif
 A, B ou C = semi-quantitatif ou qualitatif multiclassés

- Descripteur** Attribut exprimant la variabilité possible des caractéristiques topo-structurelles de la station par un choix de critères p.ex. niveau hydrique, localisation
- Critère (=description)** Etat exprimant la nature précise d'un descripteur donné p.ex. présent ou absent (qualitatif), fort-moyen-faible (semi-quantitatif)
- Type de régénération** Combinaison ordonnée des critères choisis pour exprimer chaque descripteur à l'intérieur d'une catégorie. (celle-ci est en relation avec la catégorie de la station)
- Catégorie** Différentiation typologique initiale séparant les stations par la position topographique ou le dynamisme des sphaignes. Nous distinguons trois catégories
- Station** Surface homogène de la tourbière caractérisée par un type unique de régénération pour une catégorie donnée
- Secteur** Regroupement de stations au sein d'une zone de haut-marais secondaire et ouvert. Le secteur est un "patchwork" de types et de catégories

éliminer d'emblée un nombre de stations trop importants), en excluant d'emblée toutes les possibilités de régénération en milieu forestier.

1.2. REGION PROSPECTEE ET SELECTION PRELIMINAIRE DES TOURBIERES

Nous avons inventorié les sites tourbeux du Jura occidental, principalement sur les cantons du Jura, de Berne, de Neuchâtel et partiellement dans le canton de Vaud. Sur la base des cartes et des fiches remplies lors de l'«inventaire national des hauts-marais et des marais de transition» (GRUENIG *et al.*, 1986), nous avons analysé chaque tourbière afin de ne retenir que celles présentant des unités secondaires favorables à la régénération, des secteurs ouverts, et des sphaignes.

Ainsi, pour notre inventaire de terrain, seules les tourbières de l'Inventaire national répondant à ces critères ont été visitées. Le tableau 1 présente les résultats de cette première approche.

1.3. L'APPROCHE TYPOLOGIQUE

1.3.1. Définition

Basés sur de nombreux tests préliminaires de terrain et la visite de plusieurs sites importants, les critères retenus font appel essentiellement à la nature structurelle et topographique des stations, plus qu'à la flore.

La complémentarité entre la position spatiale de la station et la structure générale de la couverture de sphaignes sur la surface forme le critère initial de stratification de l'échantillon. La figure 2 résume l'organisation de l'échantillonnage.

Comme premier niveau différenciateur, trois catégories permettent d'illustrer l'ensemble des cas rencontrés:

- 1° La station en régénération est localisée sur un secteur abaissé ou élevé de la tourbière que l'on peut nommer "replat". Les sphaignes forment des coussinets multiples et isolés créant une *mosaïque végétale* régulière avec une végétation muscinale, herbacée ou chaméphytique "indépendante". La surface du sol peut être plate, en légère pente ou perturbée, mais elle ne présente jamais d'obstacle majeur pouvant influencer le drainage latéral de l'eau ou son accumulation. L'entier de la surface présentant une mosaïque homogène est prise en compte dans cette catégorie.
- 2° Comme la catégorie précédente, la station en régénération est localisée sur un "replat" de tourbe, en position abaissée ou élevée. Les mousses couvrent l'entier de la surface homogène considérée, qui présente ainsi un *tapis continu de sphaignes*. La surface du sol présente les mêmes caractéristiques que la catégorie des mosaïques. Cette deuxième catégorie illustre une grande diversité floristique de milieux, sans les différencier.
- 3° La station en régénération est située dans une *creuse*, c'est-à-dire dans une position surbaissée. Cela impose que l'observateur reconnaisse nettement la présence d'au moins deux murs d'exploitation de la tourbe, et que ceux-ci jouent un rôle de barrage (protection contre le drainage, accumulation d'eau).

Tableau 1

Présentation des sites inventoriés du Jura suisse

Tourbière de	No CH	Carte 1:25000	Coordonnées	Surfaces secondaires selon Grünig et al 1986	Régénération potentielle	% surface inventorié
Jura vaudois (sans la Vraconnaz)	0	0	0 / 0	oui	non	0
Bellelay / La Sagne	1	1105	580,400 / 233,800	oui	oui	100
La Gruère	2	1105	570,525 / 232,150	oui	oui	90
La Chaux-des-Breuleux	3	1105	570,350 / 230,500	oui	oui	100
La Tourbière des Veaux	4	1105	574,000 / 232,375	non	non	0
Les Embreux	5	1105	575,600 / 234,700	oui	non	0
Plain de Saignes	6	1105	573,350 / 236,700	oui	non	0
Les Enfers	7	1105	569,775 / 237,200	oui	oui	100
Les Rouges-Terres	8	1105	571,650 / 234,100	oui	oui	100
Chanteraine	9	1124	563,100 / 229,100	oui	oui	100
La Chaux-d'Abel	10	1124	562,625 / 225,100	oui	oui	100
Les Pontins	11	1124	566,450 / 219,850	oui	oui	100
Les Chauchets	12	1143	540,430 / 207,775	oui	non	0
Le Maix-Rochat	13	1163	539,575 / 205,150	oui	oui	100
Les Sagnes Rouges	14	1163	544,830 / 200,575	oui	non	0
Les Ponts-de-Martel	15	1163	546,500 / 205,000	oui	oui	100
Le Cachot	16	1143	542,000 / 206,750	oui	oui	70
La Châtagne	17	1163	538,700 / 204,200	oui	oui	100
Rond Buisson	18	1163	535,200 / 203,000	oui	oui	100
La Joux-du-Plâne	19	1144	564,550 / 217,750	oui	non	0
Les Saignoties	20	1143	548,750 / 215,325	oui	oui	100
Le Creux de l'Epral	21	1124	561,900 / 228,425	non	non	0
Mouille de La Vraconnaz	22	1182	525,800 / 188,400	oui	oui	60
Ronde Sagne	41	1105	577,250 / 232,400	oui	non	0
Pâturage du Droit	42	1105	575,150 / 231,450	oui	non	0
A l'Ouest du Prédame	43	1105	573,750 / 233,630	oui	oui	100
Derrière les Embreux	44	1105	575,600 / 235,325	oui	non	0
Forêt du Pêché	45	1105	569,700 / 235,300	oui	oui	100
Les Royes	46	1105	569,100 / 233,350	oui	non	0
La Sagnotte (Les Verrières)	47	1162	528,200 / 195,225	oui	oui	0
Près de la Cornée	48	1162	528,530 / 202,625	oui	oui	0
Le Brouillet	49	1162	531,150 / 200,500	oui	oui	100
Chez Petoud	50	1163	532,000 / 201,350	oui	oui	100
Champ-Meusel	55	1124	567,150 / 223,375	oui	non	0
Les Bochats	56	1163	537,650 / 196,450	oui	oui	100
Les Sagneites / Boveresse	57	1163	535,630 / 199,125	oui	oui	100
Les Eplatures	568	1144	551,430 / 214,900	oui	oui	100
Le Petit Saignois	574	1143	548,250 / 214,800	oui	oui	100
Marais de Pouillere	575	1144	549,600 / 215,800	oui	oui	100

% de surfaces répertoriées sur l'ensemble du Jura suisse:

75.6%

Les deux premières catégories regroupent les stations répondant à des critères écologiques "terrestres" alors que la troisième catégorie rassemble les stations en régénération directement influencées par la présence de l'eau (hydrosères).

Pratiquement, chaque station est attribuée à une catégorie principale selon un code chiffré (1= MOSAÏQUE, 2=TAPIS CONTINU, 3= CREUSE).

La régénération est exprimée par un type, défini par des critères qualifiant une série de descripteurs topo-structuraux (classe). Ces descripteurs illustrent des conditions et des niveaux évolutifs du type de régénération décrit. Pour chacune des trois catégories, les descripteurs représentent des classes un peu différentes, définies par les caractéristiques propres à chaque catégorie. La figure 2 présente les définitions exactes de chaque terme.

Les descripteurs communs aux trois catégories sont:

1° localisation géographique de la station dans le haut-marais

Les critères de choix de ce descripteur illustrent trois positions spatiales. La station peut être au cœur du massif tourbeux, à sa bordure mais en liaison directe avec une végétation de haut-marais, ou à sa bordure et en contact direct avec des terrains utilisés pour l'agriculture.

2° degré de couverture du sol par les chaméphytes

Pour le taux de recouvrement des chaméphytes, nous avons créé deux catégories avec une limite à 25% de recouvrement. Nous considérons intuitivement cette limite comme illustrative d'une modification importante du rôle protecteur des chaméphytes sur le sol.

3° existence de buttes à sphaignes

Elles sont présentes ou absentes.

4° degré d'humidité du sol

Il s'apprécie par le degré d'imbibition du sol sur lequel l'observateur se déplace. Soit le terrain est humide mais sans eau apparente, soit il y a présence marquée de dépressions inondables (gouilles), soit enfin, l'eau libre apparaît en quantité importante jusqu'en surface et crée un plan d'eau (mare). Ces deux dernières possibilités sont identifiables indépendamment du niveau hydrique du moment (période sèche ou pluvieuse) car elles marquent nettement la microtopographie du terrain et la répartition floristique.

5° épaisseur résiduelle de la tourbe

Suite aux exploitations de la tourbe, l'homme a abandonné le marais en laissant une épaisseur résiduelle de tourbe variable. Nous différencions cette épaisseur de tourbe (le sol du haut-marais) en trois catégories par analogie aux analyses déjà effectuées sur la qualité des tourbes du Jura (GOBAT *et al.*, 1986). Une limite est fixée à 60 cm pour caractériser les sols épais des sols minces. Nous avons de plus choisi une limite à 30 cm afin de cerner les conditions les plus extrêmes, rencontrées suite aux exploitations quasi totales de la tourbe.

6° stabilité du sol (compaction)

La stabilité du sol s'apprécie en marchant sur la station. Soit le sol est stable (ou spongieux sans plus à cause du tapis de sphaignes), soit la masse végétale réagit dans son ensemble aux

Figure 3

Organisation des classes de descripteurs pour les trois catégories (mosaïques, tapis continus et creuses)

catégorie 1: les mosaïques								
Descripteurs Critères	localisation	tourbe nue	végétation	chaméphytes	buttes	niveau hydrique	épaisseur tourbe	stabilité du sol
A	dans le haut-marais	présence de tourbe nue	BM acide sec	présence de chaméphytes	buttes à sphaignes présentes	pas d'eau apparente	tourbe < 30 cm	sol stable
B	bordure naturelle	absence de tourbe nue	BM acide humide	chaméphytes inf. à 25%	buttes à sphaignes absentes	présence de gouilles	tourbe de 30 à 60 cm	sol tremblant
C	bordure agricole		BM alcalin "Calthion"			présence d'une mare	tourbe > 60 cm	sol instable
D			lande à chaméphytes					
E			géophytes cespiteux					
F			végétation prairiale					

catégorie 2: les tapis continus						
Descripteurs Critères	localisation	chaméphytes	buttes	niveau hydrique	épaisseur tourbe	stabilité du sol
A	dans le haut-marais	présence de chaméphytes	buttes à sphaignes présentes	pas d'eau apparente	tourbe < 30 cm d'épaisseur	sol stable
B	bordure naturelle	chaméphytes inf. à 25%	buttes à sphaignes absentes	présence de gouilles	tourbe de 30 à 60 cm d'épaisseur	sol tremblant
C	bordure agricole			présence d'une mare	tourbe > 60 cm d'épaisseur	sol instable

catégorie 3: les creuses							
Descripteurs Critères	localisation	chaméphytes	buttes	niveau hydrique	épaisseur tourbe	stabilité du sol	arbres
A	dans le haut-marais	présence de chaméphytes	buttes à sphaignes présentes	pas d'eau apparente	tourbe < 30 cm d'épaisseur	sol stable	rec. arbres < 25 %
B	bordure naturelle	chaméphytes inf. à 25%	buttes à sphaignes absentes	présence de gouilles	tourbe de 30 à 60 cm d'épaisseur	sol tremblant	rec. arbres > 25 %
C	bordure agricole			présence d'une mare	tourbe > 60 cm d'épaisseur	sol instable	

pressions verticales: le sol est alors qualifié de "tremblant". Enfin, dans les cas les plus extrêmes, le sol est instable et il est risqué de s'y aventurer, le radeau végétal étant encore trop lâche.

Pour les creuses, outre ces six descripteurs communs aux trois catégories, nous avons ajouté un descripteur relatif à la couverture arborée car il est apparu rapidement que dans cette situation, les jeunes arbres jouent un rôle important sans que l'on soit en environnement réellement forestier. Comme pour le rôle des chaméphytes, nous avons intuitivement placé la limite des deux catégories à 25% de recouvrement.

Pour les mosaïques, deux descripteurs complémentaires ont été intégrés.

1° Afin de permettre la différenciation du type de végétation formant la mosaïque avec les plages de sphaignes, nous avons considéré six structures végétales:

- a: le bas-marais acide sec, par analogie à la variante sèche du *Caricion nigrae trichophoretosum caespitosi* de GALLANDAT (1982) ou au *Caricion nigrae* de FELDMEYER-CHRISTE (1990), avec *Nardus stricta*, *Potentilla erecta*, *Trichophorum caespitosum* et des surfaces parfois importantes de *Polytrichum strictum*.
- b: le bas-marais acide humide, par analogie au *Caricion nigrae comaretosum palustris* de GALLANDAT (1982) et aux sous-associations à *Sphagnum fallax* et *Sphagnum angustifolium* de ce même groupement décrites par FELDMEYER-CHRISTE (1990), avec, outre les sphaignes, *Potentilla palustris*, *Eriophorum angustifolium*
- c: les prairies humides par analogie à l'alliance du *Calthion* de GALLANDAT (1982) avec *Cirsium palustre*, *Cirsium rivulare*, *Polygonum bistorta*, *Trollius europaeus*
- d: les landes à chaméphytes, sans attribution phytosociologique particulière, caractérisée par une couverture de sous-arbisseaux (*Calluna vulgaris*, *Betula nana*, *Vaccinium uliginosum*) par analogie aux groupements décrits par FELDMEYER-CHRISTE (1990) ou MATTHEY Y. (1986)
- e: les groupements à géophytes cespiteux principalement caractérisés par la dominance de *Molinia caerulea*, *Trichophorum caespitosum* et *Eriophorum vaginatum*. Ces groupements sont attribués à l'alliance du *Caricion davallianae* par GALLANDAT (1982). FELDMEYER-CHRISTE (1990) les décrit comme un stade évolutif des *Oxycocco-Sphagneia*.
- f: les prairies sur tourbe sans statut phytosociologique propre. Ce sont des groupements à dominance de végétation prairiale (*Poa pratensis*, *Agrostis tenuis*, *Deschampsia caespitosa*, *Festuca rubra*)

2° Un huitième descripteur est attribué aux mosaïques afin de permettre la mise en évidence de plages de tourbe nue. Elles sont présentes ou absentes.

La figure 3 montre l'organisation des descripteurs pour chaque catégorie ainsi que les critères de chaque descripteur.

1.3.2. Application pratique

Sur le terrain, toutes les tourbières répondant aux critères d'un potentiel de régénération (surfaces secondaires selon GRUENIG *et al.* 1986, milieux non boisés et présence de sphaignes) ont été visitées selon la même méthodologie (tableau 1).

Figure 4

Exemple d'application de la fiche typologique

Descripteurs	catégorie 3: les creuses						
Critères							
A	dans le haut-marais	présence de chaméphytes	buttes à sphaignes présentes	pas d'eau apparente	tourbe < 30 cm d'épaisseur	sol stable	rec. arbres < 25 %
B	bordure naturelle	chaméphytes inf. à 25%	buttes à sphaignes absentes	présence de gouilles	tourbe de 30 à 60 cm d'épaisseur	sol tremblant	rec. arbres > 25 %
C	bordure agricole			présence d'une mare	tourbe > 60 cm d'épaisseur	sol instable	

Ainsi, une creuse située sur un contact naturel, avec plus de 25% de chaméphytes, sans buttes à sphaignes, avec quelques gouilles en eau, plus de 60 cm d'épaisseur de tourbe, un sol stable et des arbres est définie par le type:

BABBCAB (ce cheminement est visualisé en ombré sur le tableau)

1° Les zones secondaires sont repérées et parcourues afin de localiser les secteurs sur lesquels il y a effectivement néoformation de plages de sphaignes.

2° Chaque secteur avec régénération est divisé en surfaces homogènes, circonscrites en fonction des trois catégories de bases et des types de régénération mis en évidence par la qualification des classes de descripteurs. Ainsi, comme le décrit la figure 2, chaque station est qualifiée par un type de régénération, une catégorie ainsi qu'une surface. La figure 4 illustre un type possible pour la catégorie des creuses.

3° Outre ces renseignements topo-structuraux collectés pour toutes les stations retenues, nous avons rassemblé diverses informations complémentaires de nature floristique (espèces les plus présentes) et "pédologique" (stratification par la couleur et la structure de la tourbe d'une carotte extraite à la tarière). Ces informations ont été systématiquement notées à la première occurrence de chaque type puis, pour les autres stations de types identiques, selon la similitude des caractères floristiques. Ces informations complémentaires n'ont pas fait l'objet d'analyse de résultats.

Après le parcours et l'inventaire le plus exhaustif possible de chaque secteur secondaire non boisé des tourbières du Jura, il a été possible d'analyser statistiquement aussi bien les aspects qualitatifs et quantitatifs des types de régénération que les surfaces couvertes par chacun.

1.4. METHODE D'ANALYSE DES DONNEES

1.4.1. Analyse statistique simple

Les statistiques de base (proportions, moyennes, écarts-types, corrélations, régressions) ont été calculées grâce aux programmes informatiques dBase IV et Excel 4 sur PC compatible. Ces programmes nous ont également permis la mise en valeur des tableaux et figures relatifs aux traitements statistiques et aux résultats bruts.

1.4.2. Analyse multivariable

L'analyse multivariable est actuellement largement utilisée lors de recherches en écologie (GALLAND 1982, GOBAT 1984, BUTTLER 1987, SCHNEEBELI 1988). Les principes généraux sont expliqués dans GAUCH (1982), LEGENDRE & LEGENDRE (1979), ORLOCI & KENKEL (1985), WILDI (1986). L'influence du codage des données est discuté par NAKACHE (1973).

Pour notre part, nous avons utilisé quelques possibilités analytiques du programme MULVA-4 sur PC compatible (WILDI & ORLOCI, 1990).

Les analyses multivariées ont été effectuées séparément pour chacune des trois catégories décrites. Dans tous les cas, seule la variabilité des types de régénération a été analysée, sans tenir compte de la fréquence d'apparition de ceux-ci. Ainsi, les fichiers de base comportent 48 objets (=relevés) pour les creuses, 46 pour les mosaïques et 30 pour les tapis continus. Chaque objet représente un type de régénération, exprimé une seule fois. L'ensemble constitue les 124 types mis

Tableau 3

Codification par décomposition des descripteurs en caractères booléens (codification binaire de chaque critère) pour analyse multivariable

	Descripteurs	Critères	Sigle pour analyse	codage binaire	
1	localisation	dans le haut-marais bordure naturelle bordure agricole	D1DANSHM D1BORDHM D1BORDAGRI	1- OUI 1- 1-	0- NON 0- 0-
2	chaméphytes	présence-absence	D2CHAMEPHYT	1-	0-
3	buttes	présence-absence	D3BUTTES	1-	0-
4	niveau hydrique	pas d'eau apparente présence de gouille présence de mare	D4PASEAU D4GOUILLE D4MARE	1- 1- 1-	0- 0- 0-
5	épaisseur de tourbe	< de 30 cm de 30 à 60 cm > de 60 cm	D5INF30 D530A60 D5SUP60	1- 1- 1-	0- 0- 0-
6	stabilité du sol	stable tremblant instable	D6STABLE D6TREMBLANT D6INSTABLE	1- 1- 1-	0- 0- 0-
7	arbres	présence-absence	D7ARBRES	1-	0-
8	tourbe nue	présence-absence	D8TOURBENUE	1-	0-
9	type de végétation	bas-marais acide sec bas-marais acide humide "Calthion" lande à chaméphytes géophytes cespiteux "prairie"	D9BMSEC D9BMHUM D9CALTHION D9LANDE D9CESPITEUX D9PRAIRIE	1- 1- 1- 1- 1- 1-	0- 0- 0- 0- 0- 0-

en évidence dans le Jura. La numérotation de ces relevés correspond à un nombre de 3 ou 4 chiffres spécifiant une station. Elle n'a pas de signification pour l'analyse. L'ensemble des types est présenté aux annexes 1, 2 et 3. Des analyses faisant intervenir la fréquence relative des types (pour le total des 369 stations) ont montré une superposition exacte des types identiques sans information supplémentaire, l'image totale étant la même. Elles ne sont donc pas traitées ici.

Le codage des données

Comme l'indique BUTTLER (1987) en citant les expériences de JENSEN (1970) et VAN DER MAAREL (1979), le codage des données permet de faire varier l'importance des objets et des descripteurs lors de l'analyse. Dans notre cas, nous avons effectué de nombreux essais pour retenir finalement le codage des descripteurs selon des critères qualitatifs binaires.

Pour les analyses multivariées liées à ce codage, le traitement choisi permet la classification ordonnée des types par groupes et la mise en évidence des descripteurs les plus discriminants. Pour mener l'analyse, nous avons appliqué la procédure proposée par WILDI & ORLOCI (1990) et adaptée par le Dr. A. Buttler du Laboratoire d'écologie végétale de l'Université de Neuchâtel pour les matrices à peu de relevés/espèces (macrocommande APLMUL12 in BUTTLER, 1991)). Le traitement peut être résumé par:

- Classification des types et des descripteurs puis formation de groupes hiérarchiques.
- Sur cette base, une analyse factorielle des correspondances est effectuée
- Elle est suivie d'une analyse des concentrations.
- Un réarrangement des groupes est effectué selon un gradient intra-groupe (selon l'analyse factorielle des correspondances) et inter-groupe (selon l'analyse des concentrations).
- Une analyse discriminante est menée pour retenir les descripteurs exprimant au mieux les groupes.
- Un tableau structuré est imprimé.
- Un graphique du "nuage" de points projetés sur les deux meilleurs axes factoriels est figuré.

Nous avons choisi d'exprimer chaque critère possible des descripteurs comme une espèce propre variant selon un code binaire (0 ou 1). Selon NAKACHE (1973), se basant sur la théorie mathématique de l'information (concept d'entropie de SHANNON, 1948) l'expression de paramètres qualitatifs à k modalités par k variables booléennes ne produit pas de perte d'information. Dans notre cas, l'ensemble de nos descripteurs est de nature qualitative (ou semi qualitative et transformé en descripteur qualitatif multiclasse) ce qui nous autorise à effectuer ce codage. Le tableau 3 présente cette codification. 26 critères sont exprimables comme autant d'espèces. Compte tenu de la création de certaines espèces "vides" et par l'existence de critères parfaitement colinéaires (pour les descripteurs à double choix), les classes de critères retenus pour chaque catégorie sont de 15 pour les creuses (3 critères colinéaires), 18 pour les mosaïques (4 critères colinéaires et 2 critères jamais exprimés) et 11 pour les tapis continus (3 critères colinéaires et 2 critères jamais exprimés).

Tableau 4: Statistique générale

Statistiques générales par tourbière

Tourbières n°	TOTAL			CIREUSES				MOSAÏQUES				TAPIS CONTINUS						
	nb de stations	% stations du Jura	nb de types	% types du Jura	nb de stations du site	% creuses du Jura	% stations du Jura	nb de types du site	% creuses du Jura	% stations du Jura	nb de stations du site	% creuses du Jura	% stations du Jura	nb de types du site	% creuses du Jura	% stations du Jura	nb de types du site	dont unique au site
Bellelay (1)	37	10,0	23	18,5	25	18,2	6,8	3,4	2	1,2	0,3	1	1	7,3	3,0	8	3	0
La Grière (2)	16	4,3	9	7,3	9	6,6	2,4	3	1	2,5	0,5	2	1	3,3	1,4	4	0	0
Ch.-des-Breuleux (3)	29	7,9	21	16,9	10	7,3	2,7	8	2	6,2	1,4	5	5	9,3	3,8	8	3	0
Les Enfers (7)	5	1,4	5	4,0	5	3,6	1,4	5	2	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	0	0	0
La Saigne (8)	12	3,3	12	9,7	9	6,6	2,4	9	4	1,2	0,3	1	1	1,3	0,5	2	1	1
La Chaux-d'Abel (10)	99	26,8	37	29,8	18	13,1	4,9	9	5	38,3	8,4	15	12	33,1	13,6	13	5	0
Les Ponnins (11)	7	1,9	6	4,8	1	0,7	0,3	1	1	4,9	1,1	3	3	1,3	0,5	2	0	0
Le Mâle-Vechat (13)	13	3,5	8	6,5	5	3,6	1,4	4	0	1,2	0,3	1	1	4,6	1,9	3	1	1
Pons-les-Marais (15)	69	18,7	31	25,0	29	21,2	7,9	13	4	27,2	6,0	12	9	11,9	4,9	6	1	1
Le Caehat (16)	26	7,0	16	12,9	9	6,6	2,0	4	3	7,4	1,6	4	3	7,3	3,0	5	2	0
La Charagne (17)	5	1,4	5	4,0	2	1,5	0,5	1	1	1,2	0,3	1	1	1,3	0,5	2	0	0
Rand-Buisson (18)	10	2,7	6	4,8	4	2,9	1,1	3	2	0,0	0,0	0	0	4,0	1,6	3	0	0
La Vraconnaz (22)	29	7,9	15	12,1	5	3,6	1,4	4	1	3,7	0,8	3	3	13,9	5,7	8	1	1
W du Prédarmé (43)	4	1,1	4	3,2	1	0,7	0,3	1	0	1,2	0,3	1	1	1,3	0,5	2	0	0
Chez Peroud (50)	5	1,4	3	2,4	5	3,6	1,4	3	1	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	0	0	0
Puilletet (575)	3	0,8	1	0,8	0	0,0	0,0	0	0	3,7	0,8	1	1	0,0	0,0	0	0	0
TOTAUX	309	100,0	202		137	100,0	37,1	82	29	100,0	22,0	50	42	100,0	40,9	66	17	

2. RESULTATS

2.1. RESULTATS GENERAUX

Les résultats généraux sont présentés aux tableaux 1, 4 et 5 et illustrés par les figures 5 et 6.

38 hauts-marais sont recensés par GRUENIG *et al.* (1986) sur le territoire que nous avons prospecté (c.f. fig. 1, carte du Jura). Parmi eux, 35 présentent des surfaces secondaires et, selon les critères que nous avons retenus, 26 ont des surfaces avec un potentiel de régénération en milieux ouverts. Nous avons inventorié 75,6% des surfaces des 38 objets jurassiens et 89,2% des surfaces retenues comme potentielles (tab. 1).

Sur les 26 tourbières parcourues, 16 présentent des stations en régénération (tab. 4).

Le tableau 5 montre qu'un très faible nombre de types (124) illustre la régénération par rapport aux types théoriquement possibles. Si l'on sélectionne intuitivement les types les plus représentatifs de la réalité et que l'on écarte de même les cas dont la combinaison de critères apparaît comme *a priori* impossible, 3708 types sont retenus (sur les 4860) ce qui représente seulement 3,35%. De même, les 62 ha en régénération mis en évidence lors de notre recherche ne représentent que le 9% du total des surfaces secondaires et de contacts des hauts-marais jurassiens. Rapportés aux surfaces potentielles uniquement (unités 1,2,4 et 6 des milieux secondaires et 11,12,13 et 18 des surfaces de contacts selon GRUENIG *et al.*, 1986), ces 62 ha représentent environ 20% des surfaces pour les 26 tourbières considérées. Estimée uniquement pour les 16 hauts-marais ayant effectivement fournis des stations, cette proportion monte à 25,4%. Cela signifie que dans les tourbières qui présentent une régénération en milieu ouvert, 1/4 des surfaces potentielles pour cette régénération est réellement concerné.

La figure 5 illustre graphiquement la répartition du nombre de types, de stations et de surfaces par rapport aux trois catégories principales. Les creuses et les mosaïques ont des proportions de types assez équivalentes mais pour des proportions de surfaces différentes. Ce résultat indique nettement que les creuses et les fosses d'exploitation présentent de multiples visages mais toujours dans de petites zones des marais secondaires. Les autres catégories présentent d'assez nombreuses stations pour une quantité de types proportionnellement assez faible et des surface de grandeur moyenne.

La relation entre le nombre de stations recensées et le nombre de types mis en évidence pour chaque tourbière est illustrée sur la figure 6. Nous mettons en évidence une relation exponentielle classique pour expliquer les phénomènes biologiques non linéaires (LANDSBERG, 1977). Cette courbe exprime que le nombre de types de régénération possibles pour les hauts-marais jurassiens tend vers une valeur maximale et ce, indépendamment de la quantité de stations que peut offrir une tourbière. Ce résultat s'explique par le fait que le nombre de surfaces en régénération dans la tourbière (quantité de stations possibles) est directement dépendant des activités humaines et de la diversité des bouleversements que le marais a subi alors que la diversité en types de régénération est étroitement liée aux conditions abiotiques et biotiques du milieu. Après évaluation de la fonction exponentielle définie par les 16 couples de valeurs, sa résolution

Tableau 5 et Figure 5:

Statistiques générales sur les types recensés et les surfaces

catégorie	nb de types recensés	nb de types potentiels	proportion brute	nb de types plausibles	proportion corrigée	nb de stations recensées	surfaces couvertes (m2)
mosaïques	46	3888	1.2%	3024	1.5%	81	390036
tapis continu	30	324	9.3%	252	11.9%	151	172786
creuses	48	648	7.4%	432	11.1%	137	58549
total	124	4860	2.6%	3708	3.4%	369	621371

Figure 5

Fréquences des types, des stations et des surfaces par catégories

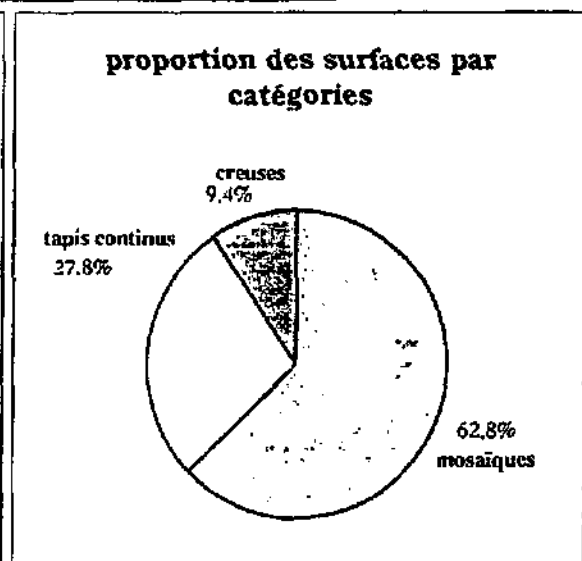
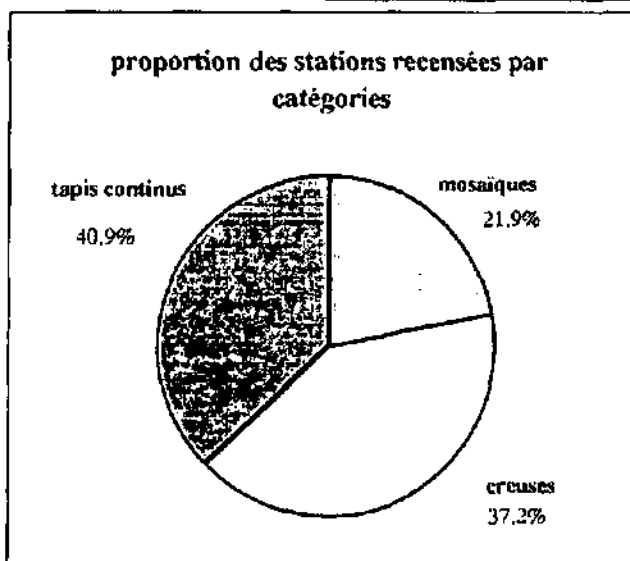
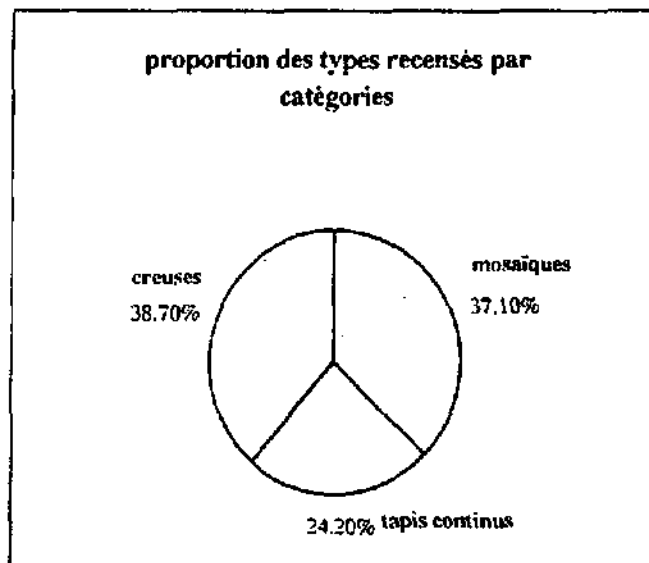


Figure 6: Relation du nombre de types par station

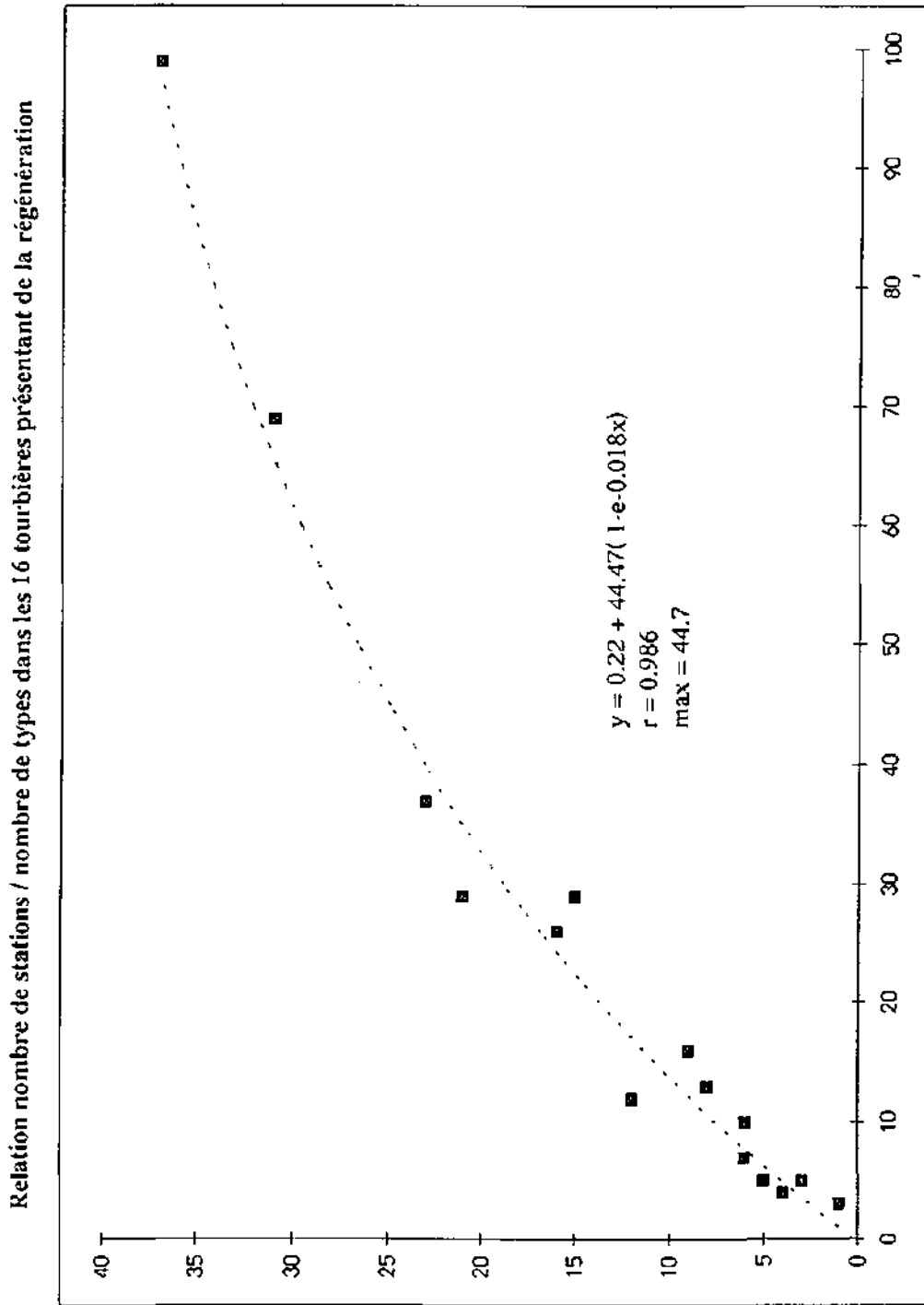


Tableau 6

Résultats détaillés par critères et catégories pour les descripteurs communs aux trois catégories

Descripteurs	creuses		mosaïques		tapis		total			
	nb stations	surface m ²	nb stations	surface m ²	nb stations	surface m ²	nb stations	%	surface m ²	%
localisation										
dans le haut-marais	113	52'561	50	273'421	118	107'654	281	76.15	433'636	69.79
en bordure naturelle	19	5'223	13	5'895	16	18'140	48	13.01	29'258	4.71
en bordure agricole	5	765	18	110'720	17	46'992	40	10.84	158'477	25.50
						total	369	100	621'371	100
chaméphytes										
> 25% de recouvr.	8	9'639	24	214'332	56	65'425	88	23.85	289'396	46.57
< 25% de recouvr.	129	48'910	57	175'704	95	107'361	281	76.15	331'975	53.43
						total	369	100	621'371	100
buttes										
présence	91	44'241	55	366'053	120	151'985	266	72.09	562'279	90.50
absence	46	14'308	26	23'983	31	20'801	103	27.91	59'092	9.50
						total	369	100	621'371	100
niveau hydrique										
pas d'eau en surface	49	20'568	73	380'501	118	143'284	240	65.04	544'353	87.60
présence de gouilles	71	29'630	8	9'535	33	29'502	112	30.35	68'667	11.05
présence de mare	17	8'351	0	0	0	0	17	4.61	8'351	1.35
						total	369	100	621'371	100
épaisseur de tourbe										
< à 30 cm	9	1'988	3	2'390	4	3'106	16	4.34	7'484	1.20
entre 30 et 60 cm	18	6'111	22	5'913	15	6'288	55	14.91	18'312	2.95
> à 60 cm	110	50'450	56	381'733	132	163'392	298	80.75	595'575	95.85
						total	369	100	621'371	100
stabilité du sol										
sol stable	68	37'692	79	385'036	142	160'460	289	78.32	583'188	93.86
sol tremblant	57	14'282	2	5'000	9	12'326	68	18.43	31'608	5.08
sol instable	12	6'575	0	0	0	0	12	3.25	6'575	1.06
						total	369	100	621'371	100

indique une asymptote de $y=44.7$. Le nombre maximum de types serait donc de 44 à 45 pour un nombre de stations très important.

Pour le Jura, la "réponse" des tourbières aux atteintes humaines est en relation complexe avec les conditions pédologiques, hydriques et climatiques actuelles. Celles-ci conditionnent la dynamique évolutive des tourbières, donc la diversité des types de régénération.

2.2. L'IMPORTANCE DES DESCRIPTEURS TYPOLOGIQUES

2.2.1. Statistique générale

Les trois catégories (replat avec mosaïques de végétation, replat avec tapis continu de sphaignes et creuses) possèdent 6 descripteurs en commun. Considérant uniquement ces descripteurs constants, nous pouvons définir pour chaque descripteur avec quelle proportion les critères possibles apparaissent. Le tableau 6 fournit ces résultats aussi bien pour le nombre de stations inventoriées, qu'en fonction des surfaces cumulées pour chaque réponse. Nous avons séparé les réponses pour chaque descripteur en fonction de leurs critères et effectué le total général. Comme le montre la figure 2, chaque descripteur participe à la définition du type de régénération par l'attribution unique d'un état. Le total du nombre de réponses pour chaque descripteur équivaut donc aux 369 stations mises en évidence et le total sur la surface confirme les 621'371 m² de milieux en régénération répondant aux critères de notre typologie.

Afin de comparer l'importance relative donnée à chaque option des 6 descripteurs pour le nombre de stations et la surface, nous avons ramené ces chiffres en % des totaux afin de pouvoir effectuer les comparaisons sur une même échelle. La figure 7 illustre le "poids" relatif des réponses fournies à chaque descripteur et permet une comparaison directe des réponses sur les nombres et les surfaces.

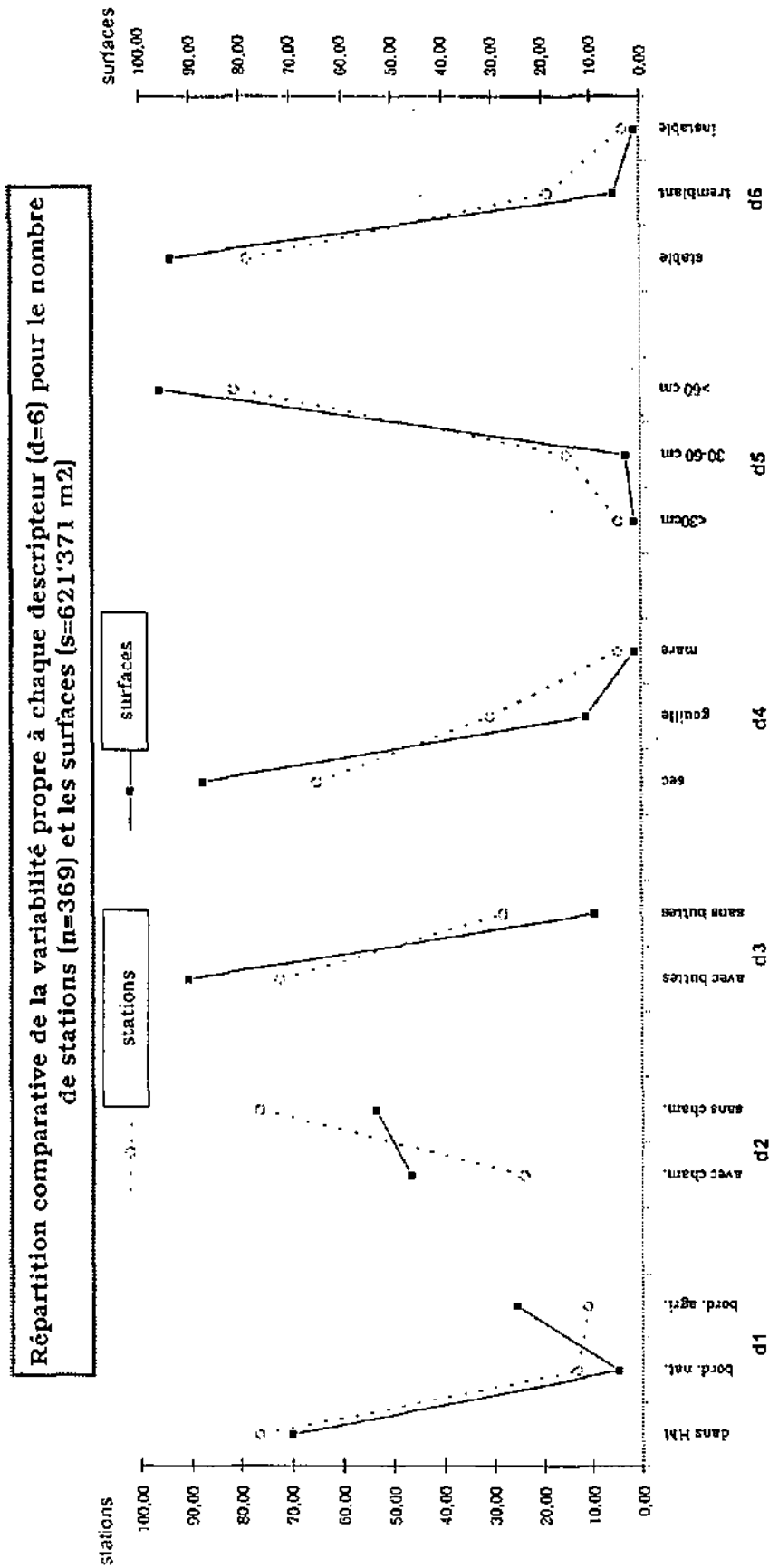
Il apparaît très clairement que tous les descripteurs présentent un critère nettement préférentiel, aussi bien pour le nombre de stations concernées que pour les surfaces cumulées. Ce résultat se confirme même pour les descripteurs offrant une triple option.

Nous pouvons donc considérer que la majorité des stations en régénération est caractérisée par:

- une localisation dans le haut-marais
- l'absence de couverture chaméphytique
- des sphaignes formant des buttes
- l'absence d'eau libre en surface
- un sol stable de plus de 60 cm d'épaisseur.

L'absence des chaméphytes est clairement dominante sur le nombre des stations. Par contre, les surfaces couvertes par les stations avec des couvertures importantes de sous-arbrisseaux sont presque autant importantes. C'est la catégorie des mosaïques qui dicte cette tendance, en relation avec une couverture végétale de lande.

Figure 7: Variabilité des descripteurs typologiques



Outre la mise en évidence d'un type nettement préférentiel, fortement présent dans les trois catégories principales, l'analyse fine permet de constater que la répartition des types de régénération n'est pas égale entre les catégories, tout comme la fréquence relative de ces types.

2.2.1.1. Les replats avec végétation en mosaïque

La diversité en types de régénération est très grande dans cette catégorie. 13 tourbières abritent des mosaïques et parmi elles, 9 sont caractérisées totalement par un seul type de régénération. Les 13 hauts-marais concernés sont caractérisés par plus de 50% de types uniques ce qui atteste de conditions locales particulières.

Par rapport au 46 types mis en évidence pour cette catégorie, 91.4% (42/46) sont présents sur un seul haut-marais et comptabilisent 61.7% des stations recensées (50/81).

2.2.1.2. Les replats avec tapis continus de sphaignes

Pour cette catégorie, la diversité en types de régénération est moins grande. 13 tourbières abritent des stations et parmi ces marais, aucun n'est caractérisé par un seul type. De plus, un seul haut-marais possède 50 % de cas spécifique.

Du point de vue du nombre de types, 17 sont présents sur une seule tourbière (56,7% des 30 types). Ils cumulent 66 stations sur les 151 de la catégorie (43,7%).

2.2.1.3. Les creuses

Comme pour les mosaïques, cette catégorie offre une importante panoplie de types de régénération et ce, sur 15 tourbières parmi les 16 qui ont fourni des stations. Trois hauts-marais présentent une typologie particulière, localisée uniquement sur ces sites. Cinq tourbières sont caractérisées par plus de 50% de types spécifiques au haut-marais.

Du point de vue du nombre de types, sur les 48 mis en évidence pour la catégorie des creuses, 29 sont présents sur un seul haut-marais (60,4%). Ces 29 types se répartissent 82 stations sur les 137 stations totales des creuses (59,8%).

2.2.2. Analyse multivariable

Les analyses des trois catégories fournissent des résultats parfaitement complémentaires et permettent de dégager les tendances évolutives de la régénération.

2.2.2.1. Les replats avec mosaïques végétales

Les résultats des deux séries d'analyses sont présentés sur les figures 8 et 9.

Pour cette catégorie, l'analyse permet de séparer les 46 types en 8 groupes représentatifs. Les 18 "descripteurs-espèces" sont présentés sur la figure 8 suite à l'analyse discriminante. Ils sont ordonnés selon l'importance qu'ils ont pour expliquer la dispersion du nuage de points illustré sur la figure 9.

Figure 8: Résultats des analyses multivariées pour la catégorie des mosaïques pour les 46 types recensés et 18 descripteurs codés en caractères binaires (tab. 3)

ANALYSE: 1 TYPES: 46 DESCRIPTEURS: 18
 Catégorie des mosaïques
 Critères descriptifs codés en caractères binaires
 MULVA - 4 Vers. 2.08

Tableau structuré suite à CLTR, à PCAB et à AOCL

Groupe de types	6	8	3	5	1	7	4	2
Types n°	44331124 25899804	433 167	42 304726	32323222 06193285	111 475	43433 32654	222 317845	11 11 1 3192016
végét: lande	11111111	1	1	1				
présence de gouilles		111			11			1
situa. dans le HM	1111 1	11	111111	1		11111		1111111
présence de chaméphytes	11111111	1	1			1 1		
situa. en bordure du HM		1	1		1		111111	
situa. en bordure agricole	1 1			11 11111	11			
présence de tourbe nue	1111 1	111	1	11111111		11111	111	
présence de buttes	11 1111	111		1 111	111	11111		11111 1
végét: géophytes cespiteux			11 11	1	111	1 1	1	11
épaisseur sol 30-60 cm	1 1			1 1 11				1 1 1
végét: BM asséché		1	1	1 11 1			1 1	
épaisseur sol < 30 cm		1	1					
végét: BM humide						11	1	1
épaisseur sol > 60 cm	11 1 111	11	11111	1 111	111	11111	111111	1 1 11
végét: prairiale				1		1	1	11 1
sol tremblant				1		1		
sol stable	11111111	111	111111	11111111	111	1 111	111111	1111111
végét: Calthion		1		1			1	1

Valeur de l'analyse discriminante (DIAN) (DF1 = 7, DF2 = 38)

RANK 1 NO. végét: structure de lande	F-VALUE: 13.702
RANK 2 NO. présence de gouilles	F-VALUE: 13.158
RANK 3 NO. situa. dans le HM	F-VALUE: 12.532
RANK 4 NO. présence de chaméphytes	F-VALUE: 12.404
RANK 5 NO. situa. en bordure du HM	F-VALUE: 12.367
RANK 6 NO. situa. en bordure agricole	F-VALUE: 9.5089
RANK 7 NO. présence de tourbe nue	F-VALUE: 9.2938
RANK 8 NO. présence de buttes	F-VALUE: 8.4659
RANK 9 NO. végét: géophytes cespiteux	F-VALUE: 3.5000
RANK 10 NO. épaisseur sol 30-60 cm	F-VALUE: 2.1081
RANK 11 NO. végét: BM asséché	F-VALUE: 1.9940
RANK 12 NO. épaisseur sol < 30 cm	F-VALUE: 1.4948
RANK 13 NO. végét: BM humide	F-VALUE: 1.4305
RANK 14 NO. épaisseur du sol > 60 cm	F-VALUE: 1.3383
RANK 15 NO. végét: prairiale	F-VALUE: 1.2789
RANK 16 NO. sol tremblant	F-VALUE: .77148
RANK 17 NO. sol stable	F-VALUE: .77146
RANK 18 NO. végét: calthion	F-VALUE: .70547

Le critère le plus discriminant est lié à la présence-absence de chaméphytes, que se soit en liaison directe les plages de sphaignes en régénération ou comme végétation compagne de la mosaïque. La présence de gouille comme très bonne information (2^{ème} position) est moins surprenant que l'information fournie par la situation "géographique" de la surface étudiée (régénération en bordure du marais ou au coeur de la masse tourbeuse).

En fait cette relation peut parfaitement s'expliquer par la nature même de la catégorie étudiée ici. Elle groupe les surfaces en régénération dont les plages de sphaignes sont en mosaïque avec un (des) type(s) de végétation asséché(s) et multiple(s) (descripteur végétation). Le type de végétation compagne influence l'expression de la régénération et est lui-même directement influencé par les contraintes écologiques et anthropiques de la bordure du marais. Il n'est dès lors pas trop étonnant que ce descripteur discrimine bien les types de régénération. Les descripteurs "tourbe nue" et "buttes" sont encore significatifs et indiquent l'évolution dynamique de ces milieux (fermeture et structuration).

L'épaisseur du sol et sa stabilité sont secondaires. Les types de végétation-compagne sont parfaitement discriminants selon leurs significations écologiques. Si les structures de landes et de géophytes sont *a priori* favorables à la régénération, il est intéressant de confirmer le rôle secondaire voir négatif des milieux eutrophes et secs.

L'analyse factorielle des correspondances menée sur les 46 types et les 18 critères binaires retenus permet de représenter les 8 groupes de types de régénération sur le graphique illustrant les meilleurs plans factoriels. La représentativité des axes factoriels est ici de 13% pour l'axe 1, 12,2% pour l'axe 2 et 11% pour l'axe 3.

Le plan 1-2 (25,2% de représentativité) est illustré sur la figure 9. L'analyse de la position relative des critères descriptifs montre que le premier axe oppose de la droite vers la gauche, les milieux à régénération pionnière (présence de tourbe nue, absence de buttes à sphaignes, végétation accompagnante plutôt minerotrophe) aux milieux offrant une image plus caractéristique d'un haut-marais en croissance (régénéré de surcroît) avec, outre l'absence de tourbe nue, des buttes à sphaignes, des chaméphytes et une végétation de lande, voire de bas-marais acide humide. L'axe 2 exprime la stabilité du sol et l'épaisseur de tourbe et également la présence ou l'absence de tourbe nue. Le gradient mis en évidence sur l'axe 1 reflète donc l'évolution des milieux en régénération, des stades pionniers offrant un paysage de haut-marais encore nettement bouleversé aux stades évolués avec une couverture végétale assimilable à un *Sphagnion magellanici* secondaire.

L'axe 3 exprime le gradient hydrique et secondairement la présence ou l'absence de buttes.

2.2.2.2. Les replats avec tapis continus de sphaignes

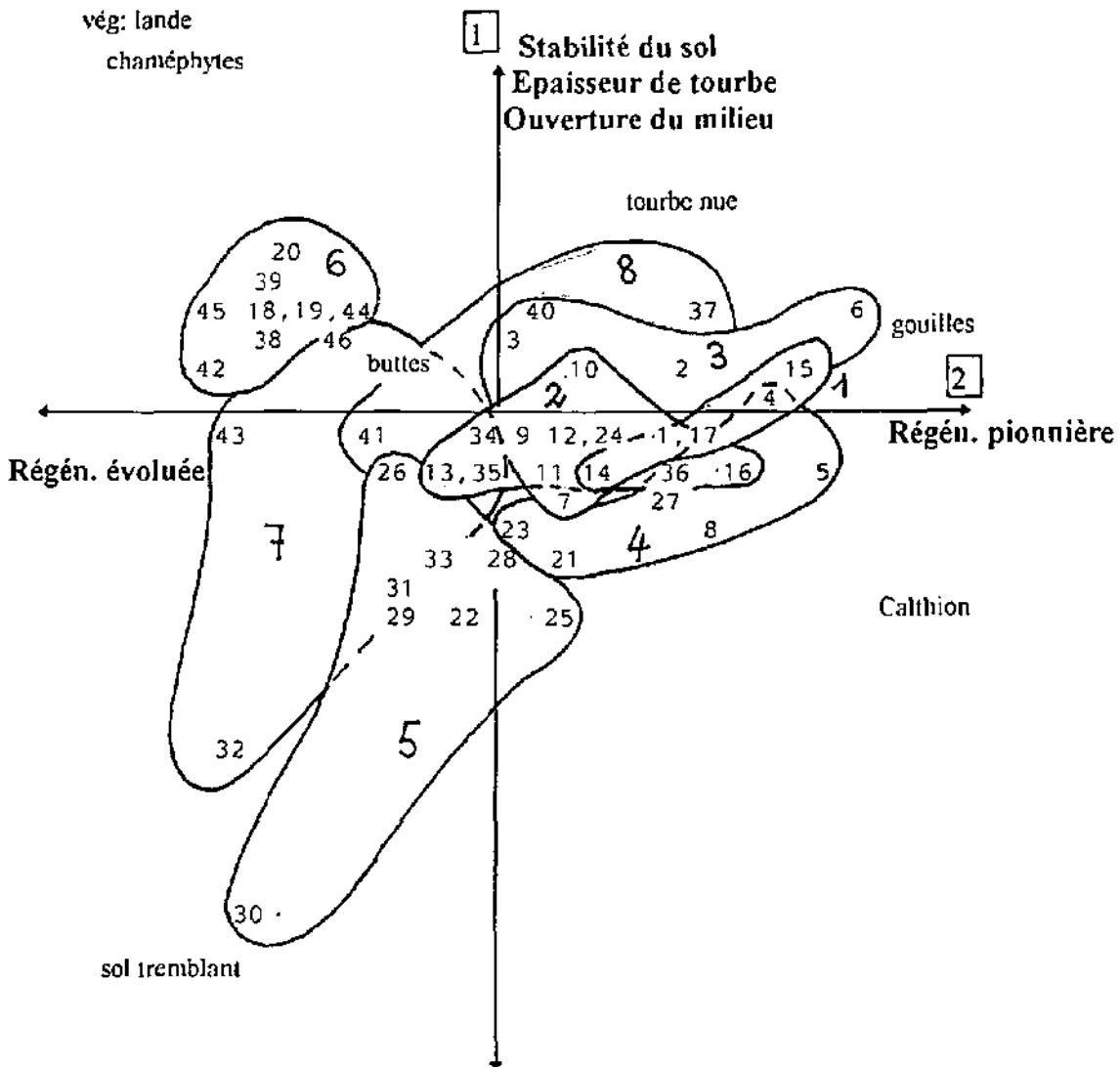
Les figures 10 et 11 illustrent ces résultats.

L'analyse menée pour ce groupe de 30 types illustrant la régénération sur de vastes secteurs couverts de manière homogène par les sphaignes montre que la situation est déjà ici plus évoluée. Le descripteur indiquant la présence-absence de buttes à sphaignes est le plus significatif pour séparer les groupes. Nous en avons sélectionné 7 après analyse visuelle du dendrogramme produit par la procédure (CLTR).

Figure 9: Analyse factorielle des correspondances des 46 types de mosaïques avec codification binaire des critères descriptifs.
plan 1 / 2 = 25,2%

ANALYSE: 2 TYPES: 46 CRITERES DESCRIPTIFS: 18
 Catégorie des mosaïques végétales
 Critères descriptifs codés comme caractères binaires
 MULVA - 4 Vers. 2.08

sol > 30 cm



Outre les buttes, l'épaisseur du sol et sa stabilité apparaissent comme discriminant pour séparer ces faciès. Cela indique qu'en phase évoluée, alors que la régénération s'est concrétisée sur des surfaces moyennes à importantes, la variabilité des conditions édaphiques n'est plus un facteur limitatif sur le terrain mais apparaît comme signature de situation ancienne et diverse. Il y a donc ici convergence des réponses (tapis continu de sphaignes) de la régénération malgré une panoplie large de conditions édaphiques de départ.

La localisation géographique devient alors secondaire. La présence-absence de gouilles et de chaméphytes semblent assez aléatoire, ce qui indique que la différenciation des buttes est ou, plus précoce ou, indépendante de ces deux critères.

L'analyse factorielle menée en seconde analyse offre pour cette catégorie les meilleures valeurs de représentativité. L'axe 1 exprime l'image possible avec 20,6%, l'axe 2 avec 17,6% et l'axe 3 avec 14,8%. Identiquement à la première analyse factorielle, ces valeurs restent très proches les unes des autres et fournissent des images assez similaires pour étaler les 30 types de régénération et les 11 critères retenus comme espèces binaires sur les meilleurs plans factoriels.

La figure 11 présente le plan 1-2 (38,2% de représentativité) et montre les 7 groupes de types que l'on a différencié. L'étalement des groupes s'explique par la position des critères descriptifs qui forment un polyèdre irrégulier, ce qui provoque un étalement des groupes, principalement vers les angles des plans factoriels.

L'axe 1 ordonne le gradient d'épaisseur de tourbe et celui du niveau hydrique en localisant les épaisseurs de tourbe faibles et l'absence d'eau libre sur la gauche du plan. L'axe 2 exprime le gradient de stabilité du sol avec les sols tremblants en bas du plan, ainsi que les présences relatives des buttes et des chaméphytes (en relation avec l'axe 3). Ce dernier permet de séparer les types selon leur localisation dans la tourbière avec une nette opposition entre les stations situées en bordures naturelles et agricoles par rapport au haut-marais.

Comme pour l'analyse factorielle précédente, on retrouve nettement le gradient évolutif mis en évidence. Les groupes 4 et 5 sont séparés par la localisation des stations en bordures de marais et l'épaisseur de la tourbe. Il ont une absence d'eau libre en surface. Les tapis de sphaignes qui se sont installés sur ces stations n'ont pas de buttes et moins de 25% de recouvrement de chaméphytes. Ce sont les stades jeunes de la régénération. Le groupe 6 caractérise les milieux les plus humides, à sols tremblants avec beaucoup de tourbe, ayant parfois des buttes mais pas encore de couverture chaméphytique importante. Les groupes 7 et 2 sont intermédiaires alors que le groupe 3 illustre l'aspect de stations régénérées évoluées, avec présences de buttes et de chaméphytes.

Figure 10: Résultats des analyses multivariées pour la catégorie des tapis continus de sphaignes pour les 30 types recensés et 11 descripteurs codés en caractères binaires (tab. 3)

ANALYSE: 1 TYPES: 30 DESCRIPTEURS: 11

Catégorie des tapis continus de sphaignes
Descripteurs codés comme caractères binaires

MULVA - 4 Vers. 2.08

Tableau structuré suite à CLTR, à PCAB et à AOCL

Groupe de types	1	4	5	3	6	7	2
Types n°	112 3974	2122221 4413208	1 11 0925	222 986	12 757	113 61012	3568
présence de buttes	111	1 11111		111	111		1111
épaisseur sol 30-60 cm	1111	1	1				
épaisseur du sol > 60 cm		1 111	1	111	111	11111	1111
sol stable	1111	111111	1 11	111		1 11	1111
sol tremblant			1		111	1 1	
situa. dans le HM	1111	1 1		1	111	11111	11
présence de gouilles	1				1	11	1111
présence de chaméphytes	1			111	1	1	1
situa. en bordure du HM		1	1 11	1			1
épaisseur du sol < 30 cm		1 1	11				
situa. en bordure agricole		11 11	1	1			1

Valeur de l'analyse discriminante (DIAN)

RANKING BASED ON F-VALUE:

(DF1 = 6, DF2 = 23)

RANK 1 NO.	présence de buttes	F-VALUE:	12.783
RANK 2 NO.	épaisseur sol 30-60 cm	F-VALUE:	7.6156
RANK 3 NO.	épaisseur sol > 60 cm	F-VALUE:	6.5370
RANK 4 NO.	sol stable	F-VALUE:	5.6026
RANK 5 NO.	sol tremblant	F-VALUE:	5.6026
RANK 6 NO.	situa. dans le HM	F-VALUE:	5.2900
RANK 7 NO.	présence de gouilles	F-VALUE:	4.7611
RANK 8 NO.	présence de chaméphytes	F-VALUE:	3.1011
RANK 9 NO.	situa. en bordure du HM	F-VALUE:	2.2517
RANK 10 NO.	épaisseur sol < 30 cm	F-VALUE:	1.6386
RANK 11 NO.	situa. en bordure agricole	F-VALUE:	1.4675

Figure 11: Analyse factorielle des correspondances des 30 types de tapis continus de sphaignes avec codification binaire des 11 critères descriptifs
plan 1 / 2 = 38,2%

ANALYSE: 2 TYPES: 30 CRITERES DESCRIPTIFS: 11

Catégorie des tapis continus de sphaignes
Critères descriptifs codés comme caractères binaires

MULVA - 4 Vers. 2.08

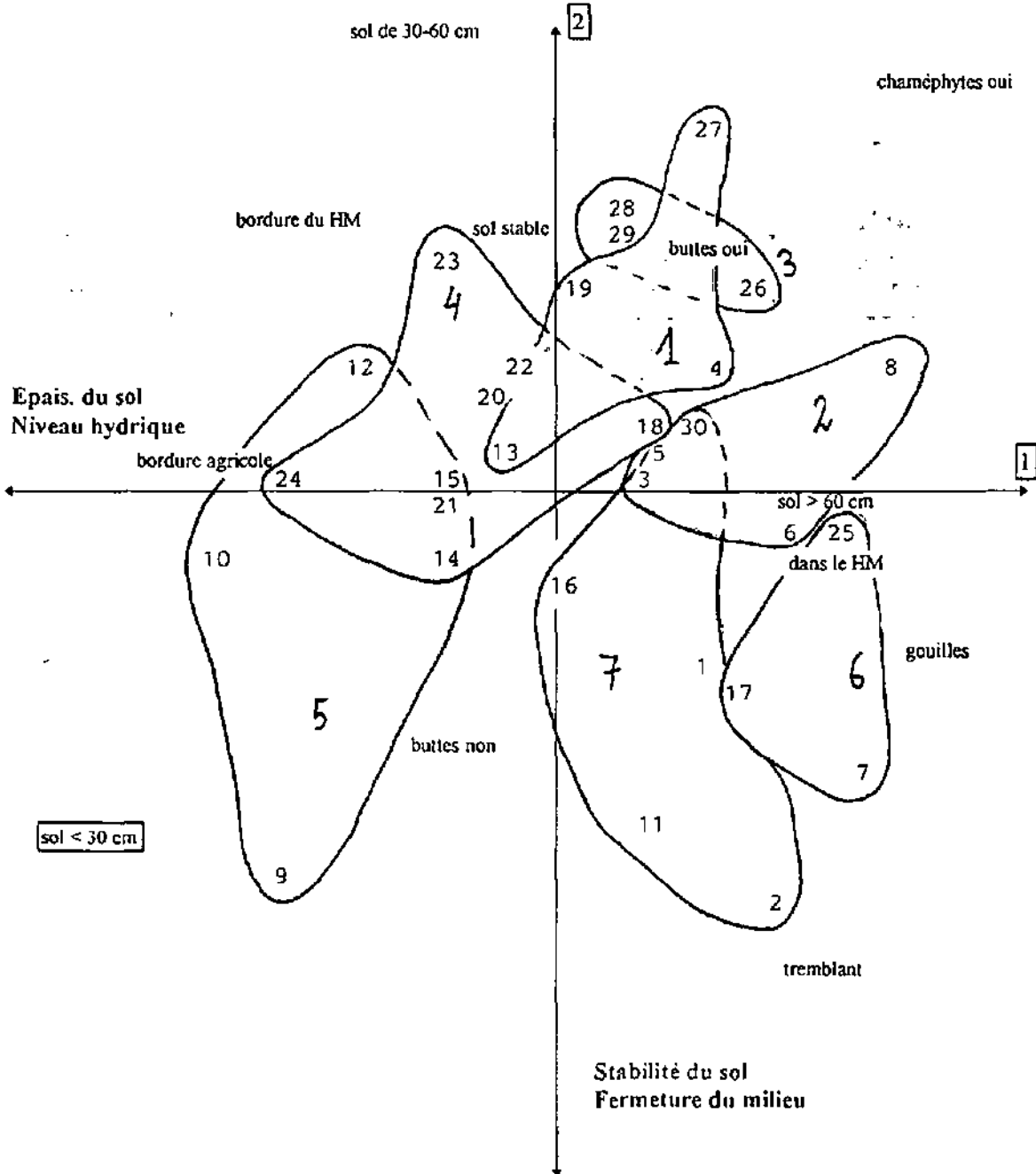


Figure 12: Résultats des analyses multivariées pour la catégorie des creuses pour les 48 types recensés et 15 descripteurs codés en caractères binaires (tab. 3)

ANALYSE: 1 TYPES: 48 DESCRIPTEURS: 15

Catégorie des creuses
Descripteurs codés comme caractères binaires

MULVA - 4 - version 2.08

Tableau structuré suite à CLTR à PCAB et à AOCL

Groupes des types	1111111111	3333333333	22222	4444444444	5555555555
Types N°	111212 1	2 4 233334	21224	2 323424	111334313444
	26453678091	4305142392	31205	4286190473	598861775687
sol stable	11		1 1	1111111111	111111111111
sol tremblant	1 1 11	1111111111	1 1 1		
pas d'eau visible	1	1 1 111 1		1111111111	1 1 11
présence d'arbres	1	1 11			1 1111 1111
présence de gouilles	1111	1 1	11111		1111 1111
sol instable	11 1 11				
situa. dans le HM	11 11 11111	111 111 1		1 11 1	111111 11111
présence de mares	111111	1 1			
absence de buttes	111 1 11111	1 1	1	11 1	1
situa. en bordure du HM	11 11 11111	111 111 1		1 11 1	111111 11111
épaisseur du sol >60 cm	11111111 11	11 111 111	11111	1 1 11 1	11 1 11 11
situa. en bordure agricole	1		1	1 11	
épaisseur du sol < 30 cm				1 1	11 1
présence de chaméphytes			1	1 1	111
épaisseur sol : 30-60 cm	1	1 1		11 1	1 1

Valeur de l'analyse discriminante (DIAN) RANKING BASED ON F-VALUE: (DF1 = 4, DF2 = 43)

RANK	1 NO.	sol stable	F-VALUE: 34.415
RANK	2 NO.	sol tremblant	F-VALUE: 20.762
RANK	3 NO.	pas d'eau visible	F-VALUE: 10.500
RANK	4 NO.	absence d'arbres	F-VALUE: 8.6262
RANK	5 NO.	présence de gouilles	F-VALUE: 7.3649
RANK	6 NO.	sol instable	F-VALUE: 6.9054
RANK	7 NO.	situation dans HM	F-VALUE: 5.9841
RANK	8 NO.	présence de mares	F-VALUE: 5.8116
RANK	9 NO.	absence de buttes	F-VALUE: 5.5078
RANK	10 NO.	situation en bordure HM	F-VALUE: 3.4243
RANK	11 NO.	épaisseur sol >60 cm	F-VALUE: 2.1070
RANK	12 NO.	situation en bord. agricole	F-VALUE: 1.8911
RANK	14 NO.	épaisseur sol <30 cm	F-VALUE: 1.7568
RANK	16 NO.	présence de chaméphytes	F-VALUE: 1.3871
RANK	15 NO.	épaisseur sol de 30-60 cm	F-VALUE: .66961

2.2.2.3. Les creuses

Les résultats sont présentés sur les figures 12 et 13. L'analyse permet de séparer les 48 types en 5 groupes.

Il est intéressant de noter que, pour les creuses, la stabilité du sol apparaît comme le descripteur le plus discriminant avec la présence de gouilles. La présence d'arbres (descripteur spécifique à cette catégorie) est fortement influençant, indiquant bien que la recolonisation des fosses subit un reboisement très rapide, lors des stades jeunes de la régénération.

Ici, attestant encore l'instabilité globale de ces milieux, la différenciation en buttes et la présence de chaméphytes ne sont pas des critères significatifs.

L'analyse factorielle des correspondances effectuée sur la codification binaire des descripteurs permet de retrouver les 48 types en 5 groupes distincts. Les trois premiers axes factoriels ont un pourcentage de représentativité assez proche et moyen (18,9% 14% et 12,7%). La proximité relative des différents critères fournit des renseignements importants pour expliquer aussi bien l'expression des axes factoriels que la répartition spatiales des groupes de types. La figure 13 présente l'image du plan 1-2 (38,2% de représentativité).

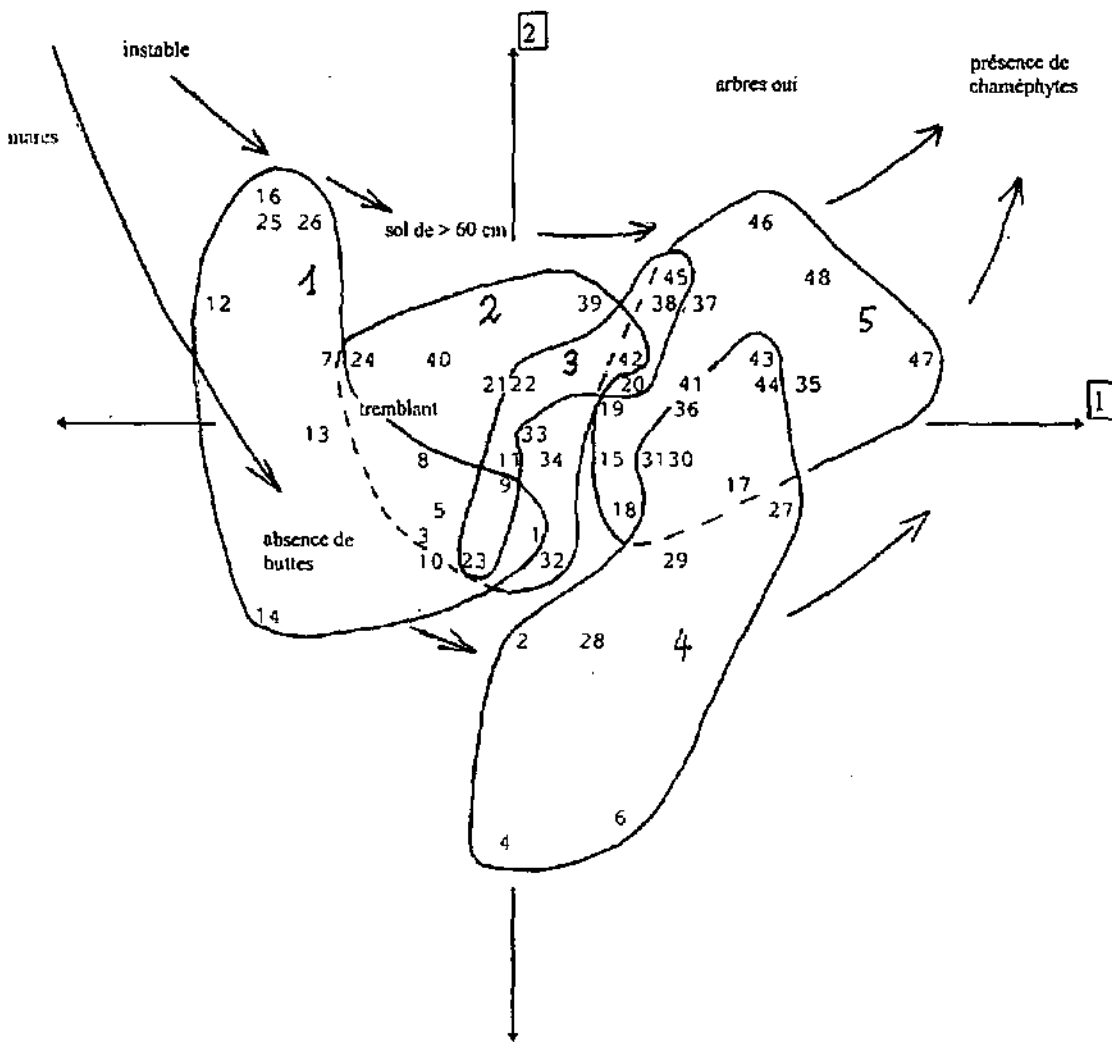
Le premier axe étire les groupes en fonction de la stabilité du terrain. Sur la gauche se rassemblent les types liés aux conditions instables avec des mares, ou des terrains encore tremblants. Ces types s'opposent à ceux de la droite de l'axe, qui illustrent des conditions stables, avec la présence de buttes, de chaméphytes et d'arbres (bouleau, pin à crochet ou épicéa). L'axe 2 exprime le gradient hydrique du haut vers le bas du graphique (mare, gouille et absence d'eau libre). Enfin, l'axe 3 exprime la localisation des stations mais en complément avec l'axe 2 (les 3 critères s'ordonnent en triangle entre ces deux axes).

Grâce à cette analyse, nous pouvons mettre en opposition l'instabilité de terrains gorgés d'eau et la présence de buttes à sphaignes avec des couvertures chaméphytiques et arborescences. Une évolution dynamique est plus nettement mise en évidence.

Outre la séparation faite sur la base des arbres, les facteurs caractérisant le mieux les types de creuses et par là les types de régénération sont illustrés par la stabilité du radeau flottant et corrolairement le niveau hydrique. Ces deux facteurs jouent du reste un rôle initial essentiel pour la régénération comme l'ont montré les expériences d'implantations de sphaignes dans des creuses expérimentales (GROSVERNIER, 1996). A l'inverse, la proximité de la bordure agricole ou l'épaisseur résiduelle de la tourbe n'apparaissent pas comme des facteurs discriminants.

Figure 13: Analyse factorielle des correspondances des 48 types de creuses avec codification binaire des 15 critères descriptifs
plan 1 / 2 = 39,2%

ANALYSE: 1 TYPES: 48 CRITERES DESCRIPTIFS: 15
 Catégorie des creuses
 Critères descriptifs codés comme caractères binaires
 MULVA - 4 Vers. 2.08



3. DISCUSSION

L'importance historique et humaine des exploitations ainsi que la dynamique évolutive apparaissent nettement à l'analyse de nos résultats typologiques.

Nous avons considéré comme important et nécessaire de séparer notre approche initiale en deux catégories indépendantes.

- 1° Les systèmes terrestres, influencés davantage par la microtopographie du sol, les écoulements superficiels et la qualité du sol. Les replats (mosaïques et tapis de sphaignes continus) illustrent ici ce système.
- 2° Les systèmes avec accumulation directe de l'eau, sous l'influence prépondérante de celle-ci, illustrés ici par les creuses.

Nos résultats permettent de confirmer ce postulat initial bien qu'en première analyse ils laissent apparaître une **uniformisation des caractéristiques topographiques et structurelles** des milieux en régénération.

L'analyse statistique générale sur la proportion des types en fonction des 6 descripteurs communs aux trois catégories fait ressortir un type de régénération comme nettement plus fréquent (fig 7). Les analyses multivariées montrent quant à elles que les **descripteurs les plus discriminants pour expliquer la variabilité des groupes de situations mis en évidence sont les mêmes d'une catégorie à l'autre (fig. 8, 10 et 12). La présence ou l'absence de buttes à sphaignes et/ou de strate chaméphytique sont les descripteurs qui apparaissent toujours dans les trois premières positions, quelque soit la catégorie traitée par l'analyse.**

En fait, les résultats statistiques généraux indiquent que, 45 ans après l'abandon des exploitations de tourbe dans le Jura, les conditions ayant permis la régénération amènent le plus grand nombre de stations à **un stade commun à toutes les catégories**. Ce stade est caractérisé par l'absence d'eau libre, des buttes à sphaignes déjà bien formées, un sol stable et une strate chaméphytique encore absente.

En se basant sur la codification des descripteurs, la critique des analyses multivariées (relations entre l'importance des descripteurs et les groupes de stations formés lors des analyses) montre par contre que suivant les catégories initiales, l'évolution a été plus ou moins convergente, en fonction des descripteurs discriminants de deuxième ordre. Considérant ces derniers, la dualité entre les systèmes aquatiques et terrestres réapparaît. Le niveau hydrique, exprimé ici par la présence ou l'absence d'eau libre en surface, est discriminant pour chaque situation. La mise en valeur des facteurs pédologiques (épaisseur de la tourbe) atteste l'importance des caractéristiques du sol dans la dynamique de la régénération. Si les conditions hydriques sont fondamentales pour les systèmes aquatiques puisque la régénération commence en milieu "liquide", les conditions pédologiques sont primordiales pour les stades initiaux de la régénération en milieu terrestre (isolation du substrat minéral) et rapidement importantes pour la catégorie des creuses puisqu'elles expriment la possibilité pour la flore de s'implanter durablement sur un substrat "stable" et légèrement au-dessus du plan d'eau.

La hiérarchisation discriminante des descripteurs pour les groupes de stations permet de montrer les niveaux évolutifs des deux systèmes.

Les analyses factorielles des correspondances menées sur le codage binaire des critères descriptifs considérés comme des espèces montre nettement cette évolution dynamique au sein de chaque système (fig. 9, 11 et 13). Cette analyse fait ressortir pour chaque catégorie les critères les plus significatifs pour isoler des phases de ces évolutions et montre la convergence des trois catégories vers les milieux les plus évolués.

Notre approche exprime un continuum dynamique dont l'évolution semble inéluctable. Nous devons pondérer cette notion de succession irrémédiable. En effet, la répartition spatiale des types observés lors de notre période de recherches est la conséquence d'une évolution jeune et rapide (en général 45-50 ans) de ces milieux secondaires. Si la convergence évolutive apparaît nettement à l'analyse, il est par contre beaucoup plus difficile de faire intervenir et de placer les voies menant (ou maintenant) à des milieux stables pendant de longues périodes (surfaces écobuées, creuses en eau). Ces milieux existent en grands nombres et sur de vastes surfaces puisque nous avons montré que seul 25% des surfaces secondaires potentielles sont en régénération effective avec des sphaignes en croissance. Les évolutions régressives, avec créations de cycles particuliers liés à de petits changements de conditions écologiques locales ne peuvent être que supposés bien que nous ne doutions pas de leur existence. Dès lors il faut considérer les évolutions dynamiques proposées comme des essais dont les boucles internes méritent une approche détaillée et particulière.

3.1. LES SYSTEMES TERRESTRES

Jusqu'à peu, les systèmes terrestres secondaires ouverts ont été rassemblés sous l'appellation de "landes de dégradation". GEIGER (1980) tente une description phytosociologique de ces milieux pour la tourbière du Cachot. Ces groupements sont également décrits en relation avec les qualités pédologiques des tourbes (GOBAT *et al.*, 1986) ou comme types particuliers, physionomiquement bien individualisés, des milieux tourbeux secondaires (MULHAUSER *et al.*, 1992). Ces deux derniers travaux confirment le rôle important de ces groupements dans la dynamique évolutive des marais secondaires et de la régénération en particulier. Vu le rôle de ces milieux aussi bien en nombre qu'en surface et leurs relations étroites avec la cicatrization et la régénération des hauts-marais secondaires jurassiens, nous considérons qu'il faut **abandonner totalement la notion de "dégradation"** attribuée à ces milieux, puisque ce terme fait plutôt penser à des milieux ayant perdu toute valeur ce qui est loin d'être le cas.

L'analyse conjointe des deux catégories terrestres nous permet de mettre en évidence deux séries évolutives parallèles et apparemment convergentes. Elles sont caractérisées par la végétation parmi laquelle les sphaignes font leur apparition. Nous pouvons différencier:

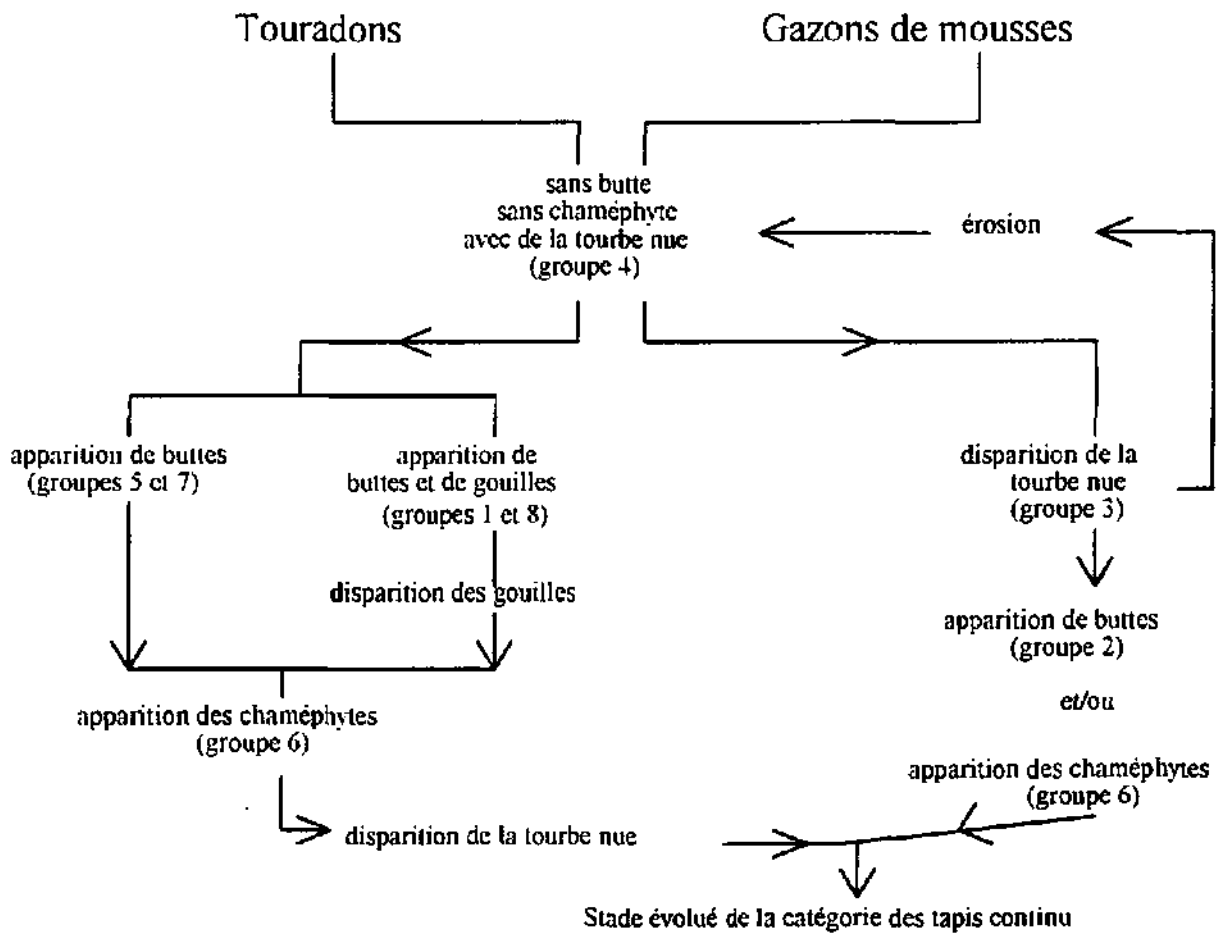
- 1° la série des géophytes cespiteux (touradons)
- 2° la série des gazons de mousses (*Polytrichum strictum*)

La catégorie des mosaïques regroupe les stades jeunes de ces séries, avec des sphaignes non encore complètement couvrantes sur l'entier de la surface. C'est donc dans cette catégorie que sont principalement différenciées les deux séries. La catégorie des tapis de sphaignes continus regroupe les stades finaux de la régénération des systèmes terrestres en milieux ouverts.

Il n'est dès lors pas surprenant de constater une importante diminution de la variété des types entre les deux catégories. Les stades finaux montrent une nette uniformisation de la physionomie des milieux. Cette uniformisation s'explique par le fait que les sphaignes présentent une couverture totale du terrain et induisent des conditions de croissance qui provoquent une diminution du rôle de la végétation herbacée. Dans les stades jeunes par contre, les relations "sphaignes-végétation herbacée" dans la mosaïque décrite sont fondamentales pour le dynamisme de la régénération, tout comme les relations "sphaignes-sols".

Ainsi, l'examen du tableau issu de l'analyse multivariée sur les mosaïques (figure 8) montre l'importance du descripteur "végétation compagne", dont les critères spécifiques ont une valeur discriminante hiérarchisée (des landes et géophytes au calthion) et fonctionnent comme séparateur des groupes. Ce descripteur permet de différencier les deux séries. En analysant en détail les groupes formés lors de cette analyse, il est possible de mettre en évidence l'évolution de la régénération selon deux voies principales, selon le schéma proposé à la figure 14.

Figure 14: Evolution dynamique des deux séries dynamiques terrestres (les numéros des groupes renvoient à l'analyse de la figure 8)



3.1.1. La série des géophytes cespiteux (touradons)

Principalement illustrée par les groupements à *Eriophorum vaginatum*, cette série présente une évolution dynamique illustrée par la voie de gauche de la figure 14. Parmi les touradons d'*Eriophorum vaginatum* se développent des plages de sphaignes puis des buttes, avec parfois des gouilles quand la microtopographie le permet. En parallèle à l'augmentation du degré de couverture du sol par les sphaignes, apparaissent les chaméphytes alors que la tourbe nue finit par disparaître sous l'évolution dynamique de la végétation. Du point de vue des milieux décrits comme végétation compagne des sphaignes, on passe du stade à géophytes cespiteux à celui de lande à chaméphytes ce qu'illustre parfaitement la figure 8. On retrouve également cette évolution vers les landes à chaméphytes sur le gradient de l'axe 1 de la figure 9. La dynamique évolutive est très diverse en ce qui concerne la transition entre le groupe 4 (fig. 14) et les deux voies décrites. De nombreuses surfaces présentent encore cette physionomie, en liaison avec l'érosion superficielle du sol et/ou les modifications pédologiques de surface. Dès lors la première étape apparaît comme un long processus d'attente voire même comme un cul-de-sac évolutif.

3.1.2. La série des gazons de mousses

Nous mettons en évidence le rôle des gazons de mousses par l'analyse complémentaire des résultats floristiques sommaires recueillis pour caractériser nos stations. Nous constatons alors que les groupements de bas-marais acides secs présentent très souvent une forte dominance de plages de *Polytrichum strictum* et de *Polytrichum commune* parmi lesquelles nous trouvons différents stades évolutifs de sphaignes. FELDMEYER-CHRISTE (1990) décrit même un groupement particulier pour ces surfaces de mousses gazonnantes avec de nombreux lichens et *Calluna vulgaris*. Son groupement illustre les stades les plus jeunes de notre série (présence de tourbe nue, sans chaméphytes et sans buttes). GEIGER (1980) caractérise également quelques unités physionomiques au moyen de l'abondance relative des plages de Polytrichs et la présence de sphaignes. Il caractérise les stades évolués de notre série au moyen des sphaignes et des chaméphytes et associe ces groupements au *Sphagnion magellanici* secondaire. Par analogie, nous sommes en accord avec lui.

3.2. LES CREUSES

Pour le Jura, ces systèmes ont déjà été étudiés sous l'angle phytosociologique et dynamique (ROYER *et al.* 1978, GILLET 1982). W. MATTHEY (1971) a abordé l'aspect écologique pour mettre en évidence les caractéristiques faunistiques et physionomiques de ces milieux.

Notre typologie ne tient pas compte de la végétation supérieure qui colonise la creuse mais tente de dégager un portrait physionomique de la fosse par la structure de la surface sphagnaie, l'importance du support pédologique (eau, épaisseur et stabilité du radeau végétal).

Les résultats montrent une grande diversité de types en relation avec les tourbières. Cela s'explique par la grande variété des activités humaines dont ces milieux sont issus. A travers le Jura, d'un haut-marais à l'autre, les modalités de travail ont été très nombreuses et les creuses abandonnées à la même époque présentaient des conditions initiales multiples (grandeur, profondeur, qualité de la tourbe laissée au fond, niveau, stabilité, circulation latérale et qualité de l'eau). La multitude des conditions initiales a provoqué principalement un démarrage de la succession à différents niveaux

(certains stades étant très abrégés voir absents) pour mener à une recolonisation végétale présentant une "réponse" assez uniforme.

ROYER *et al.* (1978) décrivent l'évolution possible des groupements végétaux selon la nature qualitative de l'eau (gradient trophique) et la grandeur des fosses.

Initialement constituée d'eau libre, la fosse est colonisée par une végétation flottante ou palustre que les sphaignes utilisent comme support pour constituer des tapis. Par leur croissance verticale et le comblement de la masse d'eau, les sphaignes peuvent former et stabiliser des buttes, créant des bombements caractéristiques du *Sphagnion magellanicum* (ROYER *et al.*, 1978). Nos résultats confirment cette dynamique. Les groupes formés par l'analyse multivariable, illustrés par la figure 12, sont individualisés grâce aux combinaisons des descripteurs principaux ("stabilité du sol", "présence-absence d'eau libre", "arbres" et "buttes"). La figure 15 présente les différentes successions convergentes que l'on peut mettre en évidence sur la base de ces groupes. Cette succession se retrouve également sur la base de l'analyse factorielle des correspondances et est figurée par des flèches sur la figure 13.

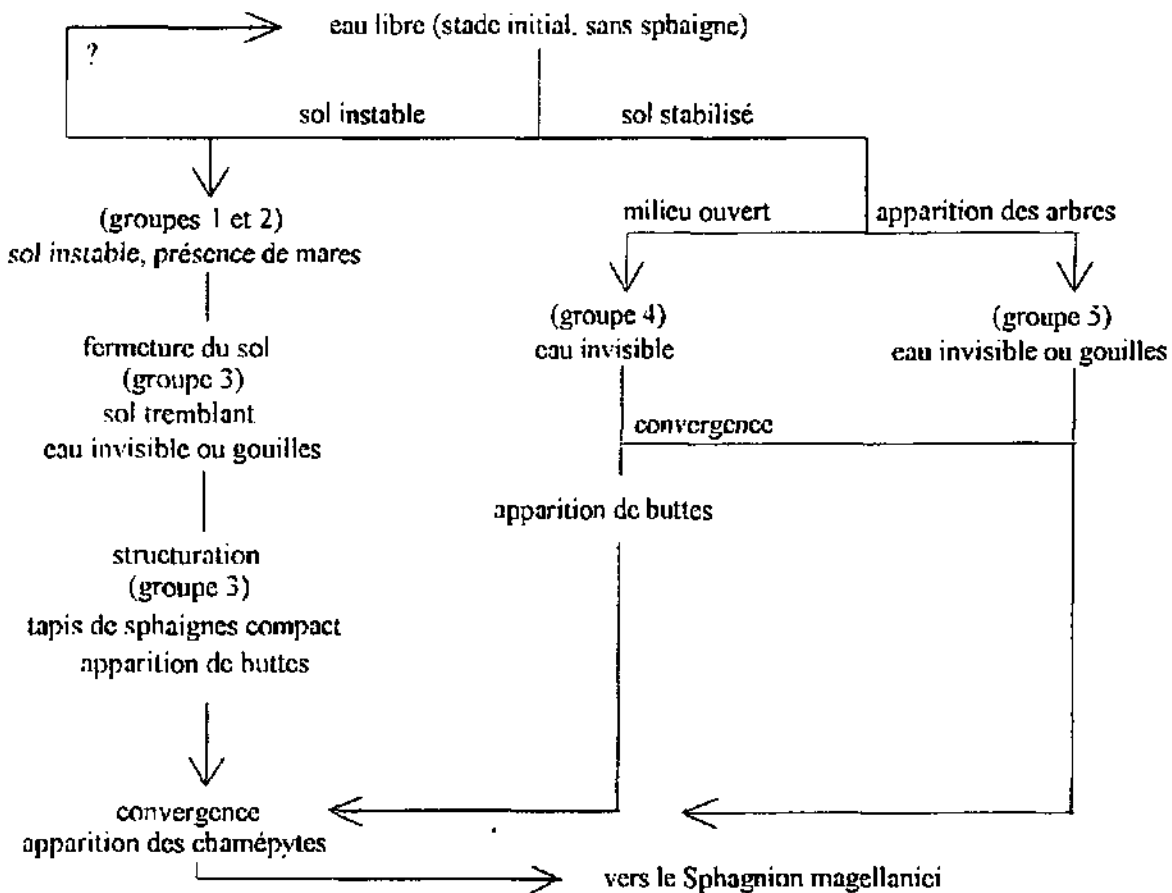


Figure 15: Evolution dynamique des groupements dans les creuses (les numéros des groupes renvoient à la figure 12)

Ainsi, deux voies distinctes apparaissent selon que le dynamisme de la végétation maintienne ou non une forte instabilité du radeau en parallèle à la colonisation par les sphaignes.

Avec un grande instabilité, les mares et gouilles se ferment lentement, empêchant l'apparition d'arbre. A terme, la structuration se marque par la fermeture du tapis de sphaignes qui différencie des buttes. Les chaméphytes apparaissent alors en relation avec la stabilisation, tout comme les arbres.

En cas de stabilisation rapide du radeau de plantes, la colonisation des arbres peut être rapide en parallèle au maintien de gouilles d'eau libre. La structuration permet la convergence des formes.

Le premier stade avec l'apparition de buttes à sphaignes dans des conditions aussi bien oligotrophes que parfois basiclines (selon le niveau de l'exploitation de la tourbe dans la fosses) est confirmé par GILLET (1982) qui décrit l'alliance du *Sphagno-Tomenthypnion* comme caractéristique de ce stade. Quand il reste de l'eau libre, la stabilité des conditions n'est pas aussi bonne par le maintien de gradient hydrique plus marqué. Aussi, il n'est pas étonnant que dans certaines conditions locales favorables, des arbres puissent apparaître avant les buttes. Ces évolutions convergent vers un stade sans eau apparente, avec des buttes et des chaméphytes et des jeunes arbres (pins et bouleaux) ce qui correspond parfaitement au *Sphagnion magellanici* typique de ROYER *et al.* (1978) et à l'évolution dynamique décrite par MATTHEY W. (1965).

4. CONCLUSION

Les analyses multivariées menées sur nos 369 stations réparties sur l'Arc jurassien permettent de mettre en évidence la convergence de réponses des milieux secondaires ouverts abandonnés par l'homme à la suite des exploitations de la tourbe. Trois séries évolutives différencient à la fois deux systèmes indépendants (aquatique et terrestre) et deux voies terrestres parallèles caractérisées par les conditions écologiques offertes aux sphaignes par la végétation ayant initialement cicatrisé le terrain abandonné.

La seconde partie de notre travail présente en détail ces trois séries par l'analyse des caractéristiques pédologiques, hydriques et micrométéorologiques de quatre stades dans le but de cerner une éventuelle constante dans les multiples conditions nécessaires pour initier et maintenir une régénération par les sphaignes.

Deuxième partie

LES SERIES

EVOLUTIVES

INTRODUCTION

Comme nous l'avons montré dans la première partie de ce travail, la saison initiale (été 1989) a été consacrée intégralement à un inventaire typologique aussi exhaustif et précis que possible. Nous avons parcouru un maximum de hauts-marais jurassiens, en localisant et décrivant leurs sites en régénération.

L'analyse de ces situations montre que l'organisation de la régénération ne se fait pas "au hasard". Les atteintes humaines initiales étant relativement identiques et contemporaines, l'évolution secondaire semble poursuivre une cicatrisation dirigée, en relation avec les conditions écologiques locales.

L'approche successioneuse a déjà été abordée pour les tourbières, mais principalement pour expliquer l'installation et l'évolution primaire des hauts-marais par les processus d'atterrissement ou de "paludification". Les synthèses de GORE (1983), TALLIS (1983), FRENZEL (1983) ainsi que BURROWS (1990) permettent de trouver de nombreuses références sur l'historique et l'argumentaire de ce sujet, en particulier sur l'évolution allogénique ou autogénique des hauts-marais (TALLIS, 1983).

L'approche successioneuse secondaire a été abordée par FRANCEZ (1990) dans l'optique de la gestion des hauts-marais perturbés. Mais cet auteur considère principalement l'évolution du bas-marais vers le haut-marais et l'influence des pratiques agricoles sur la dynamique de la succession (engraissement, fauche, ...).

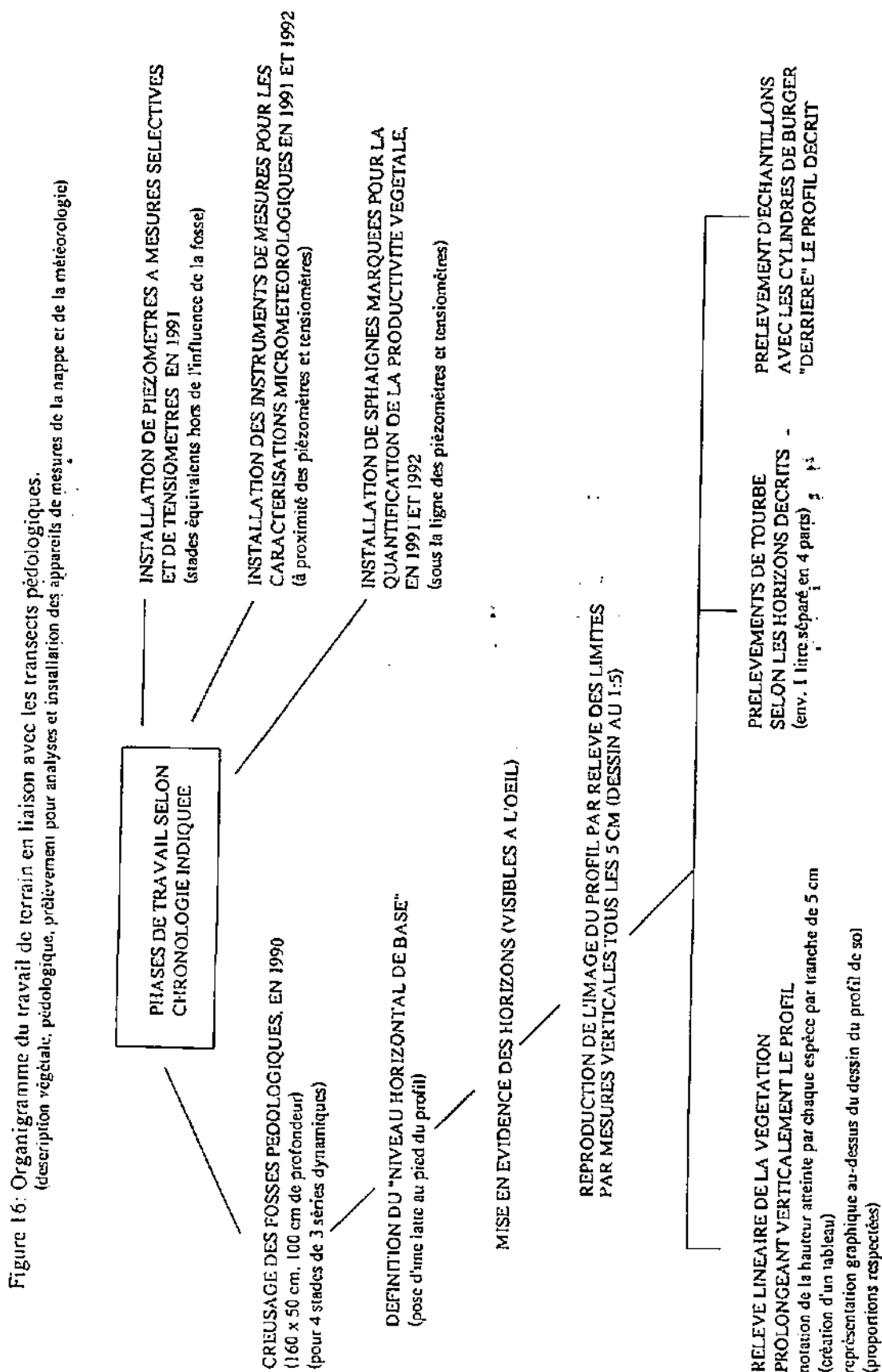
Pour notre part, nous réduisons l'approche successioneuse secondaire à la caractérisation des phases initiales de la cicatrisation végétale et de l'implantation durable des sphaignes en réaction à la destruction totale de la végétation initiale et à la mise à nu de la tourbe suite au râclage du sol. Dans ce sens, bien que l'intervention soit uniquement et directement anthropique, nous nous approchons passablement des travaux classiques cités par LEPART & ESCARRE (1983) sur la recolonisation de massifs boisés après ouragans ou incendies.

Dans notre cas, les variations minimales de l'état initial des milieux et les faibles différences des conditions écologiques locales imposent, entre 1990 et 1992, de travailler par une approche synchronique. Ainsi, suite aux caractérisations botaniques, pédologiques, hydrodynamiques et microclimatiques de 4 stades de chacune des trois successions présumées (figure 16), nous aborderons une synthèse basée sur les hypothèses de MARGALEF (1968) et ODUM (1969, 1971), ainsi que sur les mécanismes successioneux de CONNELL & SLATYER (1977), GRIME (1987), MILES (1987) et BROWN & SOUTHWOOD (1987). Nous discuterons également les travaux de PICKETT *et al.* (1987) et LUKEN (1990) sur l'aménagement et la gestion des successions secondaires.

La deuxième partie de notre travail est donc orientée par une double hypothèse de travail:

1° Décrire l'organisation spatio-temporelle de trois séries évolutives et tester la crédibilité de la notion de succession écologique secondaire pour chacune d'elles en discutant leurs convergences et leurs divergences.

Figure 16: Organisation du travail de terrain



2° Mettre en évidence le (ou les) complexe(s) de conditions écologiques nécessaires pour assurer une dynamique secondaire permettant la régénération des hauts-marais exploités. Les notions de gestion et d'aménagement seront également abordées en relation avec les buts de protection de ces milieux.

Trois séries sont utilisées comme autant de voies possibles vers une cicatrisation du terrain par la strate sphagnale. Elles n'illustrent pas la totalité des solutions possibles pour régénérer un marais secondaire mais quelques voies qui, selon nos observations et nos résultats typologiques, couvrent une grande partie des types observés dans le Jura suisse.

Comme le montre la typologie, deux systèmes sont, dès le départ, clairement séparés et opposés quant aux conditions principales de fonctionnement.

- Deux systèmes "terrestres", influencés principalement par l'historique de l'exploitation et la qualité du sol (séries des replats)
- Un système "aquatique", directement dépendant des conditions hydriques (série des creuses)

Les deux séries "terrestres" sont conditionnées par les caractéristiques écologiques des anciennes exploitations ou préparations à l'exploitation sur de vastes surfaces "planes" et mises à nu. Les observations attentives de l'été 1989 nous ont amenés à formuler l'hypothèse d'une relation entre la reprise d'activité par les sphaignes et une protection du sol par une végétation héliophile pionnière, modifiant les conditions microclimatiques de manière suffisante pour permettre la croissance des sphaignes. Nous avons ainsi mis en évidence le rôle primordial d'*Eriophorum vaginatum* (par la présence de touradons) pour une série et de *Polytrichum strictum* pour l'autre série (présence de vastes tapis muscinaux denses).

La série "aquatique" est localisée dans les anciennes fosses d'exploitation de la tourbe et est conditionnée par les possibilités et limitations de recolonisation végétale d'un plan d'eau libre. La forme de la fosse elle-même joue un rôle primordial, en tout cas pour l'installation initiale de la végétation. Une étude parallèle (GROSVERNIER, 1996) est menée sur des fosses expérimentales dans le but de préciser les limites de croissance des sphaignes en pleine eau.

Contrairement aux expériences menées en parallèle à notre préoccupation (GROSVERNIER, 1996), nos recherches ne concernent pas uniquement le stade initial de la reprise d'activité par les sphaignes sur une surface perturbée. En menant les recherches dehors, en conditions réelles de terrain, nous considérons ici une plage temporelle plus étendue du phénomène de la régénération, tout en restant orienté sur les premières phases.

Les quatre stades pris en compte pour les trois séries couvrent dans chaque système les mêmes niveaux évolutifs. Ils illustrent de plus une convergence vers des milieux secondaires analogues aux groupements dynamiques du haut-marais primaire: Les groupements et associations du *Sphagnum magellanicum*.

1. METHODOLOGIE

1.1. INTRODUCTION

Le matériel et les méthodes utilisés pour la description et l'analyse de nos séries sont décrits sous forme d'un chapitre indépendant et groupant l'ensemble des techniques utilisées. Des précisions seront toutefois données si nécessaire dans les chapitres correspondants. La figure 16 présente l'organisation des phases de travail selon la chronologie des événements et des analyses.

1.2. METHODES D'ETUDES DE LA VEGETATION

La végétation a fait l'objet de trois types de description:

1.2.1. La végétation liée au profil pédologique

Les espèces ont été notées le long d'un "transect" illustrant le développement vertical des structures végétales vivantes s'élevant au-dessus du profil pédologique. L'inventaire a été effectué par secteurs de 5 cm en 5 cm. Seule la position de l'implantation de la tige a été prise en compte pour placer les individus le long du transect. Pour chaque espèce herbacée ou chaméphytique recensée, la hauteur moyenne atteinte par les tiges et le feuillage est notée secteur par secteur. Pour les mousses (sphaignes y compris), seule la présence a été considérée. Chaque transect végétal est dessiné au-dessus de la représentation du profil pédologique correspondant. Il permet d'illustrer la relation entre le sol et la végétation.

Cette méthode a pu être appliquée aux deux séries "terrestres", pour lesquelles il a été possible de creuser une fosse stable non immédiatement inondée. Pour la série des creuses, seul le stade le plus évolué a permis une description complète. Pour les autres stades, la végétation du profil a également été décrite mais sur une distance trop courte pour permettre une interprétation correcte. Nous avons dès lors mis en évidence la végétation par la méthode des transects longs (c.f. 1.2.3.)

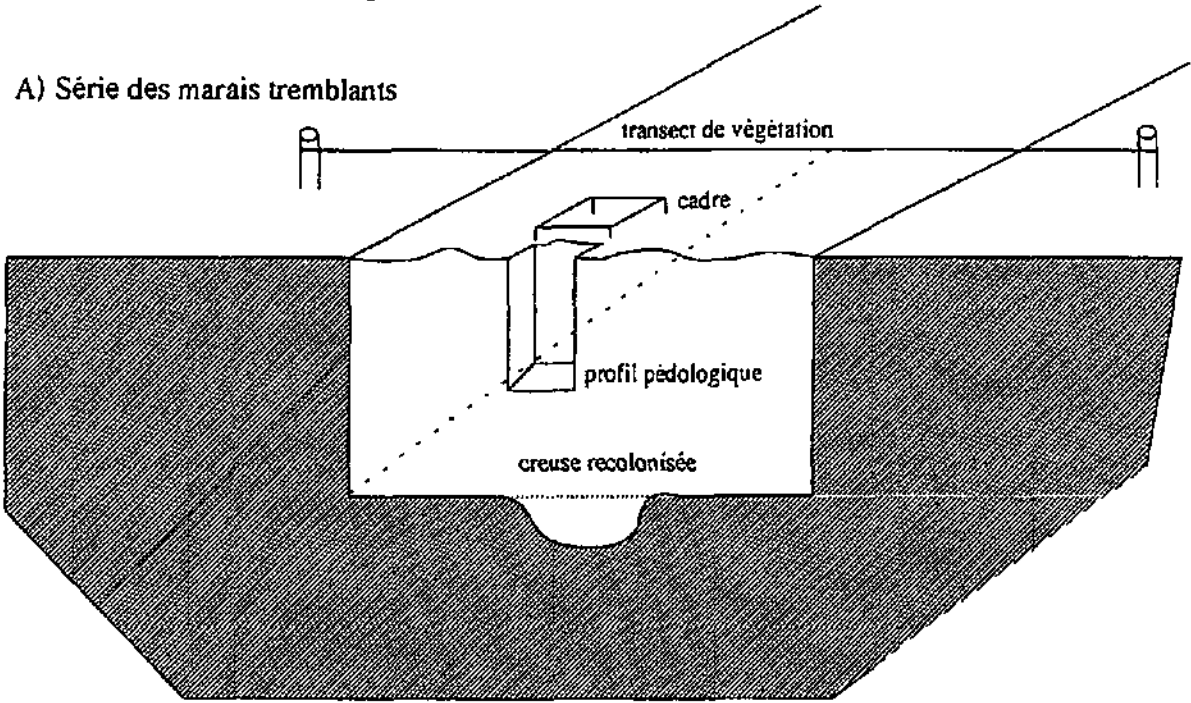
1.2.2. Description structurelle au moyen de placettes détaillées

La répartition spatiale de la végétation a été décrite dans une placette délimitée par un cadre en bois posé sur quatre piquets plantés dans le sol. D'une surface de 2m² (2m x 1m) et divisée en 50 carrés de 20 cm x 20 cm, elle permet de situer avec précision la répartition de chaque espèce. Un bord du cadre est posé parallèlement au profil pédologique. Nous décrivons ainsi la végétation se développant immédiatement "derrière" le transect, ou, plus spatialement, prolongeant la vision linéaire en vision bi-dimensionnelle. La figure 17 illustre l'échantillonnage de la végétation.

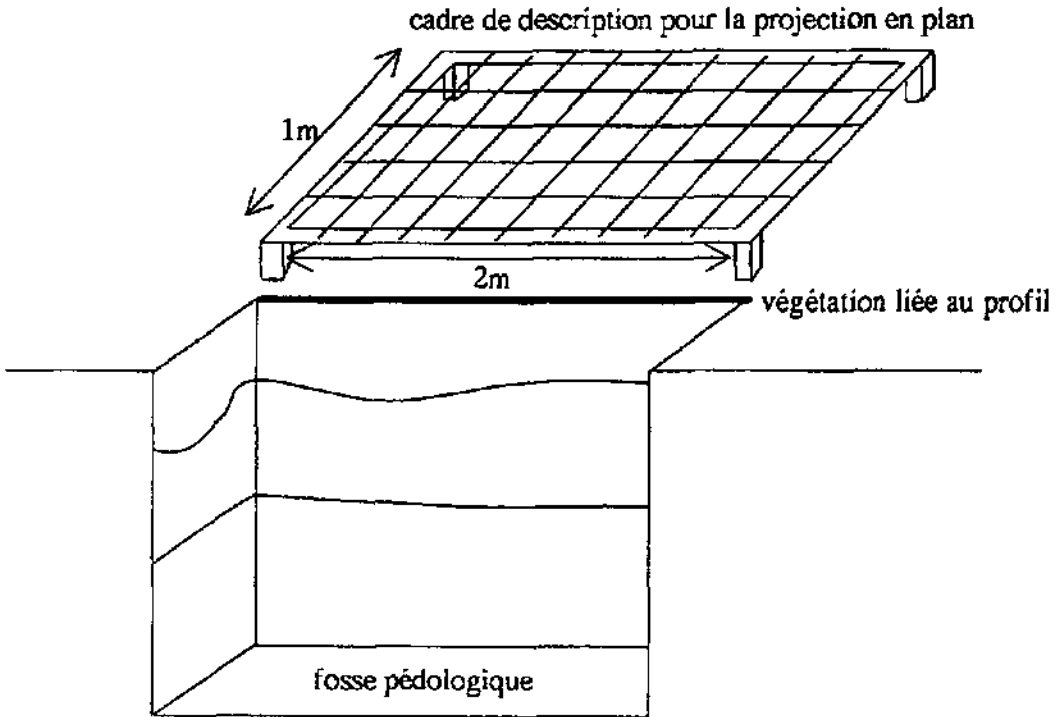
Le travail pratique consiste à noter toutes les espèces par une symbolique propre au sein de chaque carré de 20 cm x 20 cm et de reporter l'information sur un plan au 1:10. C'est ainsi un aspect graphique qui se construit carré après carré selon une codification simple assurant la notation de l'ensemble de l'information sur les 2 m² de la placette. En jouant sur les modes de présentations graphiques, on peut illustrer aussi bien la structure de la végétation que la répartition spatiale relative des espèces.

Figure 17: Localisation des installations pour la description du sol et de la végétation

A) Série des marais tremblants



B) Séries des touradons et des gazons de mousses



Pour les espèces, chaque pied est positionné dans le carré pour une apparition de 5 individus ou moins. Pour des présences plus nombreuses, quatre classes de fréquence ont été définies pour préciser l'abondance des espèces, dans le carré de 20 cm x 20 cm. Dans ce cas, le symbole de l'espèce est suivi du numéro de la classe:

Classe I:	5-20	individus
Classe II:	20-50	individus
Classe III:	50-100	individus
Classe IV:	>100	individus

Outre ces renseignements spécifiques, nous avons représenté graphiquement les pourtours des éléments les plus représentatifs et formant la structure végétale de la zone (buttes à sphaignes, touradons, projection des feuillages de chaméphytes, etc.). Le damier ainsi constitué permet de visualiser la répartition spatiale des espèces, leur abondance-dominance et surtout leur proximité et leur superposition en strates.

Cette méthode d'analyse de la végétation se base sur les mêmes principes que ceux adoptés par CHASTAIN (1952), DIERSSEN et DIERSSEN (1984) et FELDMEYER-CHRISTE (1990) pour la mise en place de placettes permanentes ou l'analyse microtopographique de la végétation des hauts-marais. Nous avons adapté la technique de relevé à nos besoins.

1.2.3. Les transects

Pour la série "aquatique", outre les descriptions végétales liées aux placettes détaillées par les cadres, nous avons décrit 3 transects longs (30,5 m, 15,5 m et 27 m). Orientés perpendiculairement aux fosses, ils traversent chacun des stades évolutifs et permettent de préciser l'organisation des groupements végétaux entre le centre des fosses et les bordures plus sèches. Nous avons choisi la méthode du transect par analogie avec les travaux de GOBAT (1984) étant donné le gradient écologique induisant des bandes de végétation parallèles à l'axe de la fosse. Ces transects complets remplacent avantageusement ceux liés aux profils.

Trois transects ont ainsi été décrits au moyen de relevés de 50 cm de longueur et de 20 cm de largeur (10 cm de chaque côté de l'axe). Les stades 1 et 2 ont été décrits sur le même transect. Les arbres sont pris en considération jusqu'à 1 m environ en bordure du transect. Par analogie au travail de GOBAT (1984), nous avons exprimé le recouvrement des espèces au moyen de 4 classes de fréquence:

- Espèce très dominante, couvrant plus de 66% de la surface, exprimée par un "9"
- Espèce moyennement recouvrante (de 10 à 66%) désignée par un "6"
- Espèce peu couvrante (moins de 10%) désignée par un "2"
- Espèce isolée ou rare par un "X"

La nomenclature des plantes supérieures (Ptérydophytes et Spermaphytes) est adoptée de Flora Europaea (TUTIN *et al.* 1964-1980). Celle des mousses est établie selon SMITH (1980) sauf pour les sphaignes pour lesquelles nous avons choisi celle de DANIELS & EDDY (1985).

1.3. METHODES D'ETUDE DES SOLS

1.3.1. Description des sols et prélèvements des échantillons

Les sols sont décrits après creusage d'une fosse de 150 à 160 cm de long, 100 cm de profondeur environ et de 50 cm de largeur afin que l'observateur puisse s'y tenir debout. Nous avons placé au pied du profil une latte de bois ajustée horizontalement afin de créer un plancher de référence.

Au sens pédologique classique; le profil n'est constitué que d'un horizon épais, résultat de l'accumulation lente de matière organique non décomposée. Selon la nomenclature adoptée du nouveau Référentiel Pédologique des principaux sols de d'Europe (AFES, 1992), nos profils décrivent des HISTOSOLS composés de divers horizons histiques (H), caractérisés autant par le type d'alimentation en eau que par les aspects du dynamisme du marais, de sa qualité trophique, de son histoire botanique ou encore de ses caractères morphologiques.

Lors de notre description de terrain, nous avons identifié et différencié les horizons au moyen de la teneur apparente en fibres, de la couleur, de la structure, de la nature des débris végétaux et de l'état de décomposition de la tourbe. Le pH dans l'eau a été mesuré immédiatement sur le terrain au moyen d'un pH-mètre "Metrohm" muni d'une électrode de verre combinée dans une proportion volumique sol:eau de 1:2,5. La figure 16 précise l'organisation des travaux de terrain au cours de notre campagne de recherches.

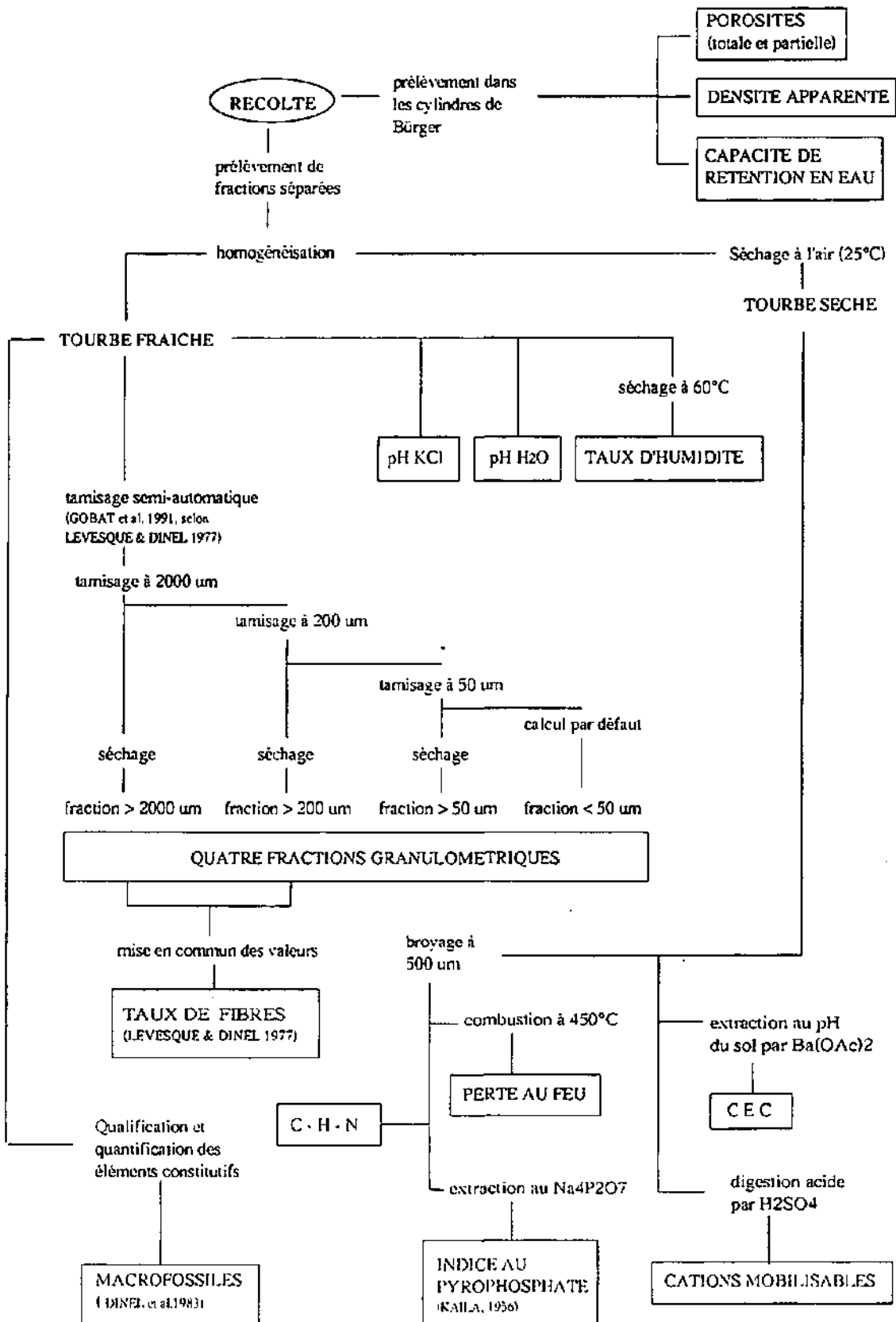
Pratiquement, nous avons dessiné les limites des horizons au moyen d'un couteau afin de marquer la tourbe avant que l'oxydation très rapide après l'ouverture du profil n'ait altéré les différences significatives. Le profil a ensuite été reproduit graphiquement avec exactitude en plaçant verticalement une règle graduée sur le plancher de référence. Après avoir noté sur un papier millimétré, la position de chaque limite d'horizon, la nature de la litière, les espèces végétales enracinées ainsi que leur développement en hauteur (c.f. chap. 1.2.1.), nous avons déplacé la règle le long du profil de 5 cm en 5 cm en reproduisant la notation. Lors de la présence de sphaignes ou d'autres mousses, outre les positions le long du profil, nous avons noté l'épaisseur du matériel mort ainsi que du matériel vivant, en considérant ces couches au même titre que des horizons.

Les échantillons pour analyses ont été prélevés après rajeunissement du profil en fonction des horizons décrits. Nous avons ainsi choisi les horizons apparaissant comme les plus significatifs dans l'optique de définir le rôle du sol pour la réapparition des sphaignes à sa surface. Tous les horizons n'ont pas été prélevés et les horizons proches de la surface ont été favorisés pour répondre à notre optique.

Pratiquement, chaque échantillon a été prélevé puis immédiatement séparé en 4 parts afin de permettre une conservation différenciée selon les besoins des analyses. Toutes les parts ont été transportées dans une glacière jusqu'au laboratoire puis congelées ou séchées selon les besoins. Une petite prise a été effectuée spécialement pour la description des macrofossiles végétaux constitutifs et conservée à la chambre froide.

Pour les besoins de la mesure du degré de compaction du sol, un prélèvement indépendant a été nécessaire pour des raisons matérielles, ce qui n'a pas manqué de nous poser quelques problèmes en fonction du changement des conditions de terrain.

Figure 18: Organigramme des analyses sur les sols



1.3.2. Analyses physico-chimiques des tourbes (figure 18)

Les méthodes utilisées sont à la fois classiques en pédologie (pH, teneur en eau, teneur en cendres, CEC, dosage des éléments totaux) et spécifiques au matériel tourbeux (teneur en fibres, indice de décomposition au pyrophosphate, porosité).

a) sur sol frais

- Teneur en eau, exprimée en % du poids sec de tourbe, par séchage à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant et refroidissement en dessiccateur.
- Acidité par mesure du pH dans l'eau selon un rapport volumique sol:eau de 1:2.5 au moyen d'un pH-mètre "Metrohm" à électrode de verre combinée.
- Acidité d'échange par mesure du pH KCl selon un rapport volumique sol:KCl de 1:2.5 au moyen d'un pH-mètre "Methrom" à électrode de verre combinée.
- Granulométrie de la tourbe par tamisage semi-automatique en milieu aqueux selon la méthode de l'Université de Neuchâtel (GOBAT *et al.* 1991) que nous avons adaptée de DINEL & LEVESQUE (1976). L'analyse granulométrique permet de définir la teneur en fibres (LEVESQUE & DINEL 1977, BASCOMB *et al.* 1977) et le classement des échantillons selon les domaines fondamentaux (SSSA 1974, BASCOMB *et al.* 1977) ou détaillés (GOBAT *et al.* 1991).

b) sur sol séché à l'air

- Teneur en cendres calculée après combustion au four à 450°C, comme complément ramené à 100 de la perte au feu.
- Capacité d'échanges cationiques (CEC) selon la méthode canadienne de l'AOAC (Association of Official Agricultural Chemistry) décrite en détail à l'annexe 4. Nous n'avons pas dosé ici les bases échangeables après diverses lectures et discussions (GOBAT, *comm. pers.*), considérant la trop grande incertitude relative à la signification des valeurs mesurées dans la tourbe acide.
- Cations mobilisables (Ca, K, Mg, Na) par minéralisation acide (12 ml H₂SO₄ 95% puris + 0.3 g du mélange (40 g de Li₂SO₄ + 1.2 g Se)) et dosage par spectrophotométrie d'absorbance atomique (SAA). En accord avec GOBAT (1984 p. 9) nous préférons le terme de "cations mobilisables" à celui de "cations totaux" puisque "*nous dosons les éléments des produits secondaires issus de l'altération des minéraux ou contenus dans des combinaisons organiques relativement labiles*". Par analogie cependant, les valeurs sont exprimées en %.

c) sur sol séché et broyé à 0,5 µm

- Indice de décomposition chimique de la tourbe. Les acides humiques (AH) et les acides fulviques (AF) peuvent être facilement extraits de la tourbe par le pyrophosphate de sodium (KAJLA, 1956). L'intensité de la coloration est dosée au spectrophotomètre (550 nm). L'absorbance ainsi mesurée, multipliée par 100 constitue l'indice au pyrophosphate ou indice "pyro".
- Carbone total, Azote total et Hydrogène total (CHN). Ces éléments ont été dosés automatiquement (combustion éclair, dosage par chromatographie gazeuse et détecteur de conductivité thermique) par l'analyseur élémentaire Carlo-Erba EA 1108 de l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel (laboratoire LASUR). Les valeurs sont exprimées en %.

1.3.3. Degré de compaction du sol

Afin de définir la porosité totale, la macroporosité (vides > 200 μm) et la mésoporosité (jusqu'à sa valeur moyenne pour les pores jusqu'à 20 μm), la capacité de rétention en eau et la densité apparente de nos horizons, nous avons mis au point une table à tension d'après le modèle de TOPP & ZEBCHUK (1979). Le mode opératoire détaillé est décrit à l'annexe 5.

Prélevés au moyen de cylindres tranchants de 98,17 cm^3 (5 cm de diamètre), les échantillons sont placés deux fois sur la table à tension pour des succions croissantes. En soumettant l'échantillon à une tension équivalent à une hauteur d'eau de 15 cm (succion équivalente à un pF de 1.18), on estime que l'on extrait l'eau des pores grossiers (macropores) jusqu'à 200 μm . Une tension provoquée par une colonne de 146 cm permet d'extraire l'eau des mésopores moyens jusqu'à 20 μm pour une succion équivalente à un pF de 2.16. On atteint alors la capacité au champ. Après dessiccation complète à l'étuve, on peut calculer:

- la porosité totale
- la capacité de rétention en eau (poids échantillon saturé / poids sec) exprimée en %
- la densité apparente du sol (poids sec / volume) exprimée en g/cm^3 .

1.3.4. Analyses des macrofossiles

La composition botanique de la tourbe renseigne non seulement sur l'origine du matériel mais permet également de différencier des échantillons aux caractéristiques physico-chimiques proches.

Nous avons adopté la méthode de la détermination des fréquences relatives d'apparition des différents restes végétaux (DINEL *et al.* 1983). Après un tamisage manuel à 200 μm pour éliminer les composantes non fibreuses, nous avons travaillé par identification d'au moins 500 pièces, sous la loupe binoculaire. Contrairement au descriptif canadien de la méthode, nous n'avons pas séparé les fractions granulométriques pour ne considérer que la composition du matériel fibreux dans son ensemble. Après quelques essais, nous avons étudié l'échantillon avec un grossissement de 6,4x et des oculaires de 10x ce qui correspond à une vision d'une surface de 2x2 cm. En cas de nécessité pour la détermination d'une pièce, nous avons utilisé le grossissement de 16x, voir de 40x. Pour compter 500 pièces, réparties en une monocouche, il est nécessaire de déplacer l'échantillon sous la loupe afin de parcourir une surface d'environ 40 à 50 cm^2 (10 à 12 zones). Le temps d'investissement est relativement important et estimé entre 30 et 45 minutes par échantillons.

Les éléments sont identifiés grâce au catalogue photographique de LEVESQUE *et al.* (1988) et aux clefs de détermination de GROSSE-BRAUCKMANN (1972, 1974), JANSSENS (1983), BIOERKBAECK & NORLING (1984), LANGE (1982) et GERDOL (1987).

Qualitativement, nous avons différencié deux niveaux de perception:

A) Qualification standard (selon DINEL *et al.* 1983)

En accord avec les expériences menées par BUTTLER *et al.* (1994) sur l'analyse de la composition végétale des tourbes en relation avec leurs propriétés chimiques, nous distinguons 6 classes d'éléments constitutifs:



Tensiomètres et piézomètres

Bellelay
Série des marais tremblants



La Chaux-d'Abel
Série des touradons

- 1° Les sphaignes
- 2° Les autres mousses
- 3° Les herbacées (*Carex ssp.*, *Eriophorum ssp.*)
- 4° Les ligneux (tiges, racines, feuilles)
- 5° Les morceaux de bois
- 6° Les agrégats

Sans distinction de taxons spécifiques, nous avons noté en plus pour chaque échantillon, le degré de décomposition des éléments observés et la nature générale des structures (racines, tiges, feuilles, complexes feuilles-rameaux). Nous n'avons pas effectué d'analyses détaillées de microphotographies pour préciser et standardiser le degré de décomposition comme le préconisent LEVESQUE & DINEL (1982).

Tous les échantillons de tourbe prélevés dans les profils des trois séries ont fait l'objet de dénombrement selon ce "standard" qualitatif.

B) Qualification détaillée

Pour la série "aquatique", il s'est avéré très important de connaître en détail l'histoire initiale de la colonisation végétale et en particulier de tenter de mettre en évidence la nature végétale du support sur (ou dans) lequel les sphaignes sont réapparues. De plus, la définition du dynamisme végétal dans les creuses de Bellélay en relation avec l'hypothèse de la double période d'extraction de la tourbe émise par PARIAT (1988) dans son travail de diplôme sont apparus comme des éléments importants pour expliquer les différences d'évolution dans ces creuses. Nous avons prélevé les échantillons le long des transects de végétation en récoltant les végétaux morts et la tourbe dans chaque groupement végétal et ce, sur toute la profondeur possible jusqu'à la marne, en distinguant chaque changement de structure végétale. Les prélèvements ont été effectués au moyen d'une tarière à chambre fermée de 50 cm de longueur. Grâce aux diverses rallonges il a été possible de descendre sans problème jusqu'à 2 mètres. Cette tarière a été spécialement construite sur la base du modèle "Macauley" (tarière palynologique).

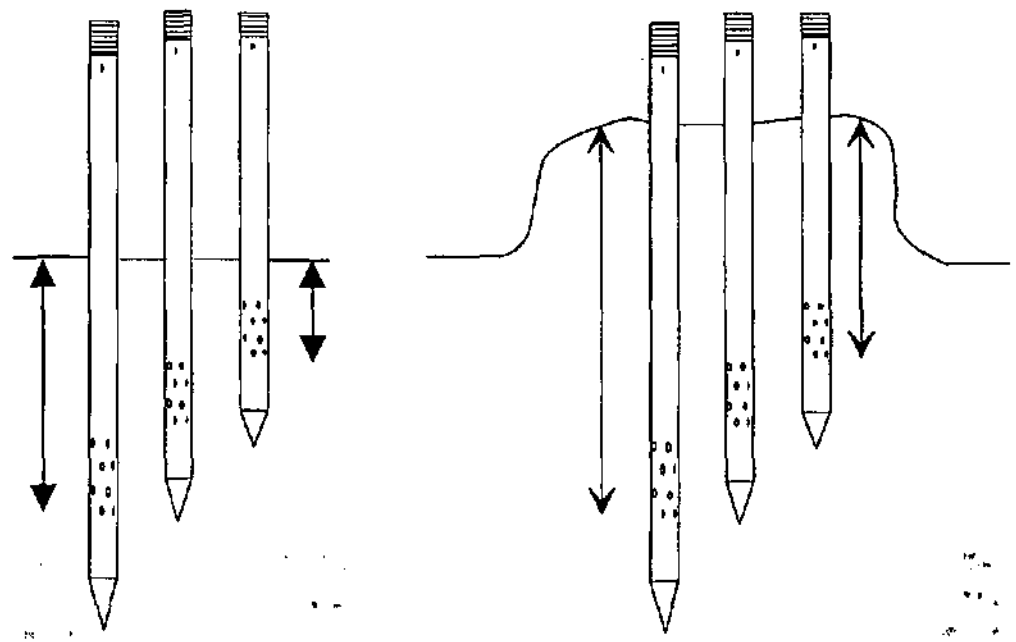
Pour cet échantillonnage, la qualification "standard" n'est pas assez fine si bien que nous avons tenté d'identifier en plus, les restes des espèces les plus indicatrices:

- La prêle (*Equisetum fluviatile*)
- Le comaret (*Potamogeton pectinatus*)
- Le trèfle d'eau (*Menyanthes trifoliata*)
- La linaigrette (*Eriophorum vaginatum*)
- Les Ericacées
- Les sphaignes de la section *Sphagnum*
- Les sphaignes de la section *Cuspidata*
- Les sphaignes de la section *Acutifolia*
- Les sphaignes de la section *Subsecunda*

Pour ces espèces, nous avons noté leur présence dans l'échantillon ainsi qu'une estimation de leur abondance relative.

Figure 19: Installation de terrain: A) piézomètres pour l'analyse des nappes B) tensiomètres avec appareil de mesures

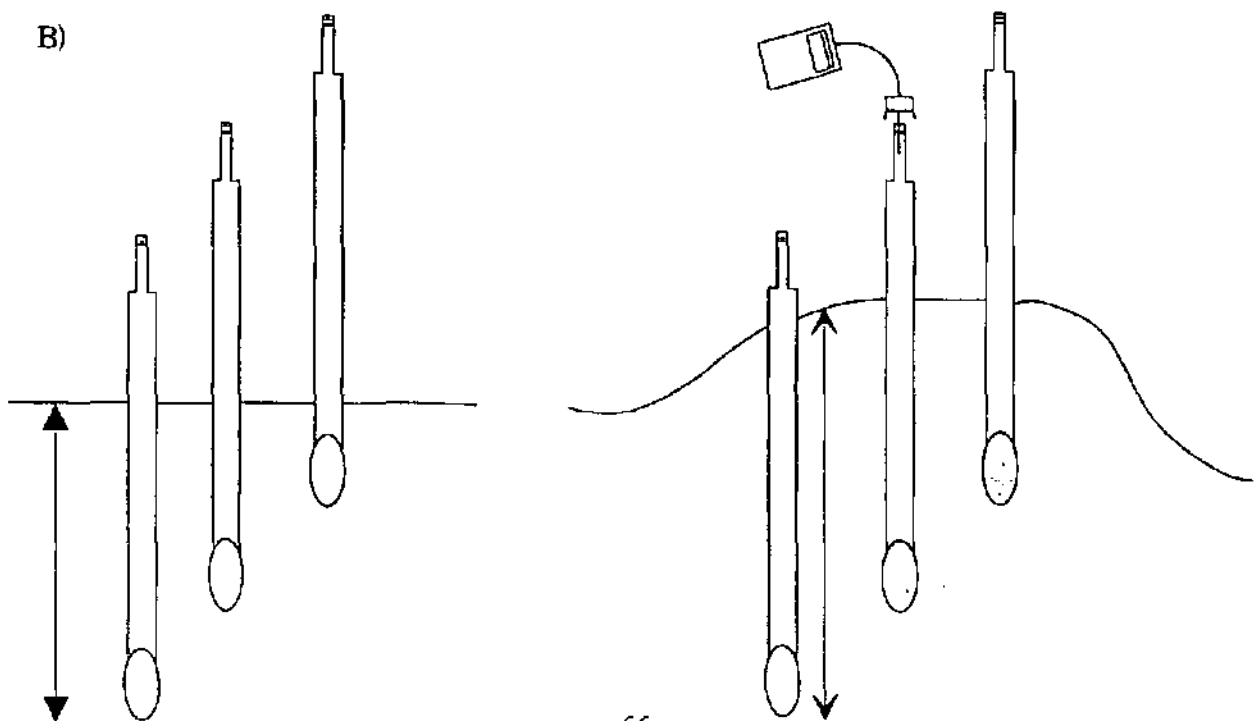
A)



profondeur de référence définie par rapport au niveau du sol entre les buttes et touradons

profondeur définie par analogie à la référence du sol entre les buttes et touradons

B)



1.4. METHODE D'ETUDE DE L'EAU DU SOL

1.4.1. Dynamique des nappes

Des mesures bimestrielles ont été effectuées pour mesurer les variations du niveau de la nappe au moyen de 48 tubes piézométriques en matière plastique de 2 cm de diamètre, perforés d'une série d'orifices circulaires sur une hauteur de 5 cm. La zone de prélèvement est localisée 5 cm au-dessus du fond qui est fermé et taillé en pointe (fig. 19). Le choix de ce modèle de piézomètres répond au besoin de mettre en évidence d'éventuelles nappes indépendantes à diverses profondeurs, en accord avec les recommandations de EGLOFF & NAEF (1982) quant aux limites des mesures piézométriques dans les sols peu perméables. Ainsi, pour chaque station, les orifices de prélèvements ont été placés à diverses profondeurs selon les horizons mis en évidence par les fouilles pédologiques voisines. Pour les prélèvements proches de la surface, les tubes ont été doublés et la valeur donnée calculée sur la moyenne des deux tubes.

Le diamètre des tubes a été choisi en relation avec les travaux de SCHNEEBELI (1988) et sur la base des observations détaillées de AHTI (1987), afin de garantir un temps de réponse optimal dans le tube par rapport aux mouvements de la nappe. Ainsi, le diamètre est petit et permet de garantir à l'eau des mouvements conjoints entre le tube et le sol. Les piézomètres ont été plantés le long d'une ligne traversant l'ensemble des sites et des conditions à tester. Nous avons nivelé en détail le transect ainsi formé en tendant horizontalement une ficelle de référence entre deux piquets. La mesure est exprimée en cm, soit en fonction de la profondeur par rapport au sol, soit par rapport à la référence horizontale. Pour les doubles mesures, la hauteur moyenne du sol est prise en compte pour l'attribution de la profondeur. Par convention, nous n'avons retenu que les valeurs pour lesquelles la hauteur d'eau mesurée dans le tube était supérieure ou égale à la base de la zone perforée. La présence d'un culot d'eau au fond du tube, sous la ligne de prélèvements est assimilé à une nappe absente.

Comme nous mesurons principalement en surface, dans des hauts-marais secondaires drainés, la saturation en eau libre est régulièrement absente. Dès lors, afin de se faire une idée des conditions hydriques du sol dans ces zones, en particulier quant à l'importance de la frange capillaire, nous avons systématiquement doublé le réseau de piézomètres par 71 tensiomètres à eau (MARTHALER *et al.*, 1983, fig. 19). Comme pour les piézomètres, nous avons planté deux tensiomètres par profondeur afin de calculer la moyenne des données. La mesure a également été effectuée tous les quinze jours, aux mêmes dates que les piézomètres au moyen d'un capteur mesurant la dépression exercée dans la petite masse d'air localisée entre le bouchon étanche et l'eau du tube.

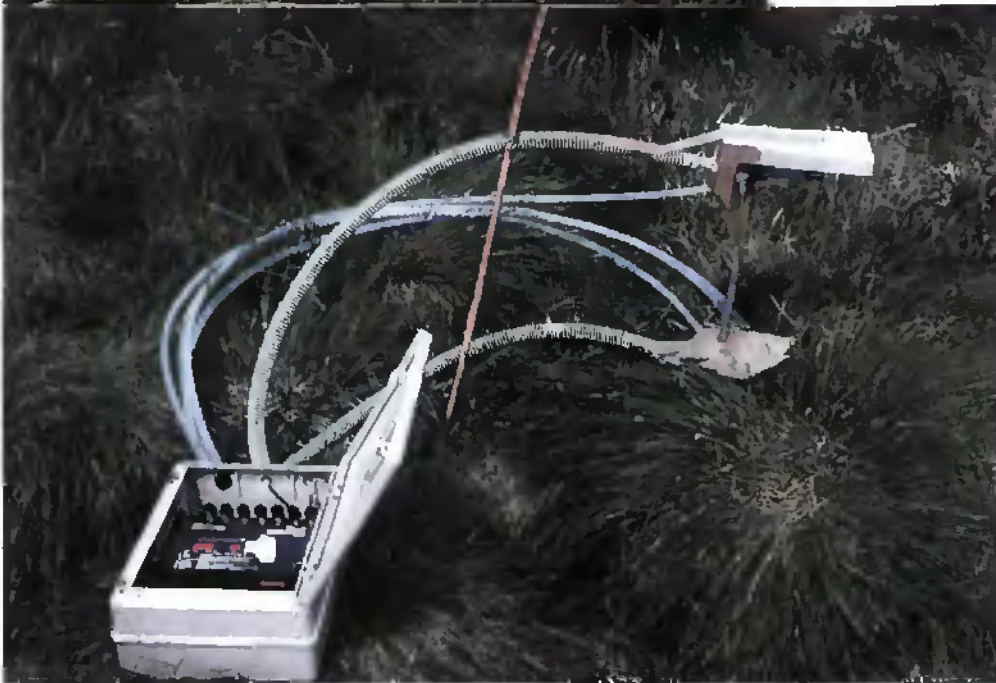
Les résultats sont exprimés en millibars (=cm d'une colonne d'eau). Pour calculer la succion (= tension ou potentiel capillaire), nous avons adopté la méthode définie par BUTTLER (1987). A la valeur donnée par le capteur, il faut déduire la hauteur de la colonne d'eau du tube (en cm) et, pour respecter la convention de VOGELSANDER (in BUTTLER, 1987), ajouter une tension de 10 millibars. Bien que principalement utilisés lors d'études hydrologiques, les tensiomètres sont de plus en plus utilisés en écologie et dans les marais en particulier. Outre les recherches de BUTTLER (1987), nous pouvons citer ceux de PAEVIANEN (1973), LAINE & MANNERKOSKI (1975), AHTI (1987), SCHNEEBELI, (1988, 1991)



Mesures micrométéorologiques

La Chaux-d'Abel
Série des touradons

Vue générale et détail d'un
enregistreur d'humidité relative
(2 sondes) et de température
(6 sondes)



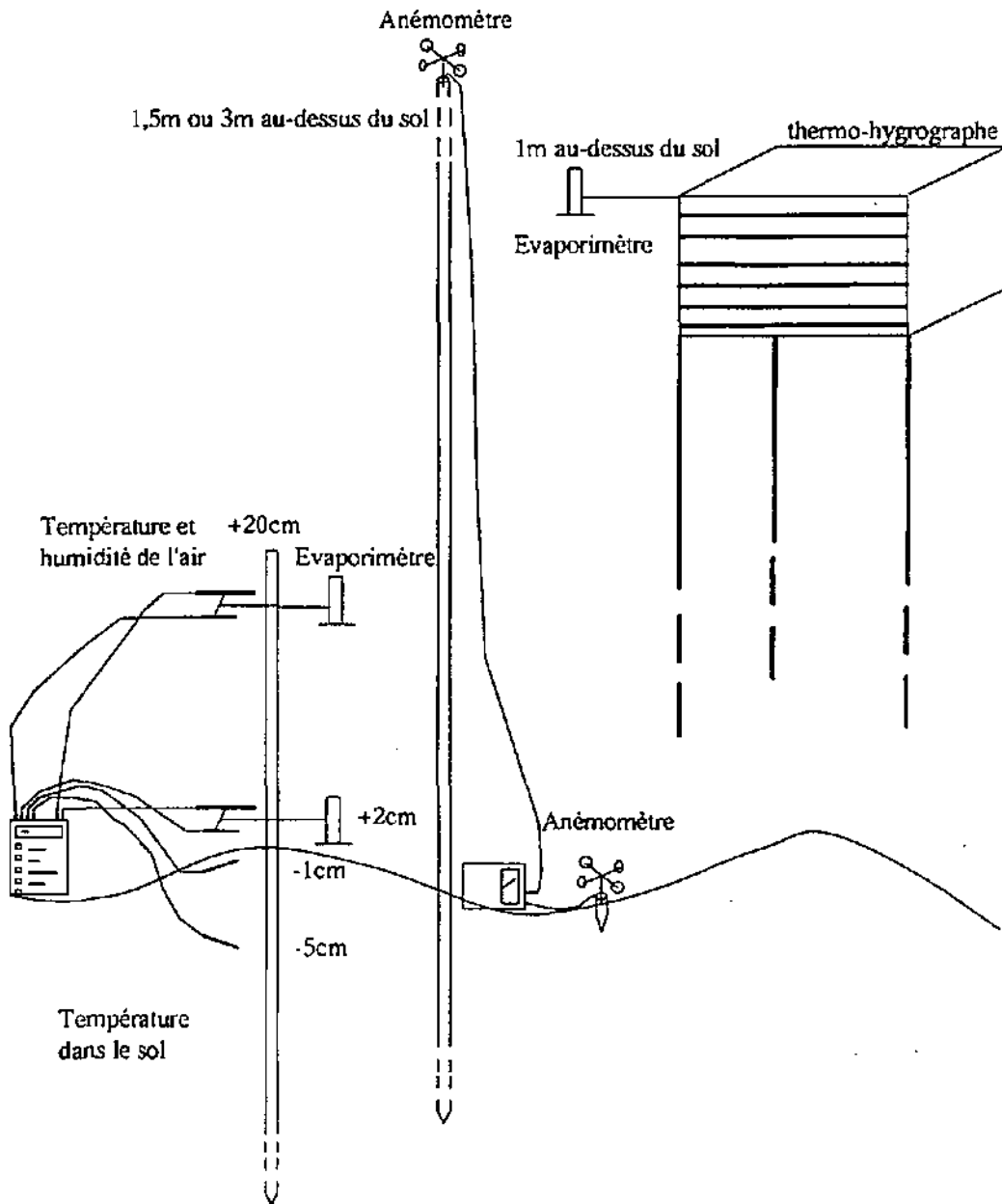
Plusieurs auteurs ont signalé des mouvements verticaux des tubes plantés en fonction du gonflement du sol sous l'effet du degré d'imbibition (NATURA 1988, GIUGNI, 1991). Ces mouvements sont en relations directes avec les fluctuations d'épaisseur des sols tourbeux sous l'influence du degré d'humidité. Les déplacements verticaux de la nappe phréatique induisent des tassements et des gonflements de la tourbe dont la composition botanique permet des réactions similaires aux colloïdes des humus, même pour des tourbes jeunes, non humifiées (AHTI, 1987). Ces phénomènes ont été mis en évidence par BADEN & EGGELSMANN (1964). Avant eux, PRYTZ (1932, in INGRAM, 1983) et plus tard UHDEN (1967, in INGRAM, 1983) signalent de tels mouvements mais sur de faibles amplitudes (3cm environ). AHTI (1987) considère ce phénomène comme important pour l'estimation de la teneur en eau et des relations "nappe libre-remontée capillaire". Il cite les travaux de KURIMO (1983, in AHTI, 1987) qui estime les fluctuations à 10% de l'épaisseur de l'horizon tourbeux pour des tourbes humifiées. Sur cette base, AHTI considère une amplitude de 5% pour les tourbes non humifiées, comme celles de Bellelay. Considérant les mouvements observés sur nos sites, avec une épaisseur de 70 cm de tourbe jeune directement sous l'influence des mouvements phréatiques, l'amplitude est plus proche de 10% que de 5%.

Afin d'éviter les mouvements verticaux des tubes eux-mêmes, nous avons planté profondément des piquets et fixé des lattes de bois pour attacher solidement les tubes. Néanmoins, un léger mouvement a été perceptible dans les deux premiers stades des marais tremblants, où nous avons constaté le gonflement et le tassement le plus important. Toute la masse végétale a entraîné l'ensemble du dispositif de fixation dans son mouvement. Comme la mesure de la nappe concerne la relation à la surface du sol, ces mouvements ne sont pas réellement dérangeants. Ils provoquent une sous-estimation de l'abaissement réel de la nappe. Il est dès lors assez difficile d'estimer l'influence de ces mouvements sur la physiologie des plantes. A priori, comme la végétation suit le mouvement, les plantes restent à la même distance de la surface d'eau libre et ne subissent pas de contraintes supplémentaires. Cependant, il est possible qu'un tassement significatif ait lieu, provoquant une augmentation de densité de la tourbe jeune et exerçant une influence sur la capillarité. La première hypothèse nous semble la plus plausible dans le cas des fosses de Bellelay, où la tourbe est homogène, lâche et totalement gorgée d'eau jusqu'en profondeur. Le mouvement vertical provoque dès lors une compression sur toute la hauteur du profil en répartissant les forces et en limitant l'action en surface au niveau des racines.

1.5. METHODE D'ETUDE DU CLIMAT

L'approche climatologique est menée sur la base des données générales fournies par l'Institut Suisse de Météorologie (climat général) et par une série de mesures ponctuelles visant la comparaison des trois séries évolutives et, pour chacune, les différences entre chaque stade significatif. Le microclimat a donc été abordé sous l'angle comparatif entre température-humidité et évaporation. Afin de garantir une interprétation valable des comparaisons, et considérant l'impossibilité de tester toutes les situations et tous les sites en même temps (manque d'appareils), nous avons adapté nos périodes d'investigations au climat général et effectué les mesures lors de périodes de beau temps stable, avec un minimum de couverture nuageuse et un air aussi calme que possible. Vu le nombre de situations à échantillonner et la durée courte des périodes de beau temps, nous avons choisi de limiter la durée des mesures à un cycle nyctéméral, voire deux, par situation.

Figure 20: Présentation schématique des appareils de mesures micrométéorologiques



Les sondes mesurant la température et l'humidité de l'air ont été protégées de l'ensoleillement et de la pluie par des abris laissant circuler l'air librement

Trois périodes saisonnières représentatives ont été choisies. Pour le printemps, les mesures ont été effectuées en mai 1992. Pour l'été, les mesures ont été faites en juillet 91. Pour l'automne, nous avons pu effectuer les mesures fin octobre-début novembre 1991. L'installation de base mise en place pour l'échantillonnage d'un micro-milieu est illustrée sur la figure 20. Trois installations identiques ont fonctionné en parallèle sur chaque site, permettant la comparaison directe de trois micro-milieus complémentaires.

Pour la série des touradons, l'ensemble des données a été acquis à La Chaux-d'Abel. Nous avons séparé d'emblée le fonctionnement en présence de sphaignes de celui caractérisé par leur absence. Pour chacun, trois faciès sont analysés. Les mesures sont effectuées au niveau du sommet du touradon (faciès 1), à sa bordure basale (faciès 2) et pour les surfaces ouvertes séparant les touradons (faciès 3). Il faut donc pour cette série deux cycles complets pour assurer la prise de données (absence et présence de sphaignes pour chaque faciès). Pour la série des gazons de mousses, nous avons choisi de différencier trois micro-milieus avec, premièrement, les surfaces croutées de tourbe nue, deuxièmement la couverture de Polytrics sans sphaigne et finalement la couverture de sphaignes en tapis dense initiant une jeune butte. Un cycle de 24 heures est nécessaire pour assurer les comparaisons directes. Pour la série des marais tremblants, un cycle nycthéral permet d'échantillonner l'ensemble des trois situations choisies. La première concerne le centre de la fosse, avec le marais tremblant, la deuxième est localisée au niveau du manteau de sous-arbrisseaux avec un tapis dense de sphaignes et la troisième dans la forêt secondaire dans le secteur sans sphaigne. Les conditions météorologiques défavorables du printemps 1992 nous ont contraints à limiter l'échantillonnage vernal de la série des touradons en groupant certaines situations avec et sans sphaignes afin de limiter l'investigation à un seul cycle nycthéral.

Pour l'approche micrométéorologique, nous avons utilisé un système semi-automatique d'enregistrement de données ponctuelles (logger de GRANT, modèle Squirrel), sur lequel nous avons couplé 4 thermistors engainés dans un tube métallique réfléchissant et deux sondes pour la mesure de l'humidité atmosphérique. Nous avons programmé le logger pour un rythme d'enregistrement de 5 minutes, soit 288 mesures en 24 heures.

1.5.1. Précipitations atmosphériques

La pluviosité n'a pas directement été mesurée sur les sites. Nous avons travaillé avec les données quotidiennes fournies par le réseau national d'observations météorologiques de l'Institut Suisse de Météorologie (ISM). Grâce au réseau des stations pluviométriques, il a été possible d'obtenir les données complètes pour les stations de La Brévine, Les Ponts-de-Martel, Mont-Soleil et Bellelay. De plus, pour assurer les meilleures comparaisons possibles à travers l'Arc jurassien, entre nos sites, nous avons considéré les valeurs des stations de La Chaux-de-Fonds et de Saignelégier. Les stations sont situées à proximité immédiate des hauts-marais (Les Ponts-de-Martel, Bellelay) ou au plus, à quelques kilomètres. W. MATTHEY (1971) a fait la comparaison entre les données du village de La Brévine et le site du Cachot. Il conclut qu'il est parfaitement possible d'extrapoler les valeurs du village, sauf peut-être pour les phénomènes orageux, parfois très ponctuels. Dans le même ordre d'idée, la station du Mont-Soleil fournit les valeurs pluviométriques pour les tourbières de La Chaux-d'Abel (distante de 3 km vers le nord) et des Pontins (distante de 3,5 km vers le sud).

1.5.2. Température et humidité de l'air

Outre les renseignements fournis par l'ISM, pour les sites de La Brévine et de La Chaux-de-Fonds uniquement, intéressants pour une comparaison avec le mésoclimat, nous avons effectué des mesures ponctuelles au moyen d'appareils placés dans les sites eux-mêmes. Un thermo-hygrographe à enregistrement continu (HAENNI) a été placé dans une cabane à 1 m du sol lors des trois périodes de mesures (été et automne 1991, printemps 1992) pour la durée des mesures (24 à 48 heures).

Pour la caractérisation des couches d'air en contact avec le sol, nous avons placé deux thermistors immédiatement au-dessus du sol (+2 cm et +20 cm), en installant des toits semi-ouverts pour maintenir l'ombre tout au long de la journée sur le tube métallique. En parallèle à ces deux thermistors, deux sondes de mesures d'humidité ont été couplées au même enregistreur de données et placées à la même hauteur.

1.5.3. Température du sol

Deux thermistors ont été placés immédiatement sous la surface du sol. Le premier est fixé dans/sous les capitulum ou dans le premier centimètre de sol. Le second est enfoncée à 5 cm de profondeur. Ces deux thermosondes sont également couplées à l'enregistreur de données GRANT.

Les hauteurs et profondeurs choisies correspondent à celles trouvées dans les travaux consultés (LELOUP & JACQUEMART 1963, SCHMEIDL 1978, FRANCEZ 1990, LUETT 1992). Pour l'interface sol-air, il est très délicat d'effectuer une mesure réellement fiable pour la surface du sol. Dans ce sens, il est communément admis que l'on considère comme surface le premier centimètre du sol, ou les capitulum eux-mêmes. Pour les sphaignes, il est important de caractériser l'évolution microclimatique des capitulum car ceux-ci sont le siège principal et majeur de la photosynthèse avec, pour les espèces de buttes, près de 98% (RYDIN, 1984). Le gradient thermique est, de plus, tellement important à travers les premiers centimètres, qu'il est inutile d'échantillonner plus en profondeur. Les auteurs cités montrent que la stabilité thermique est déjà atteinte à partir de 15 cm selon le degré d'humidité de la tourbe.

1.5.4. Evaporation

L'évaporation a été mesurée au moyen d'évaporimètres de PICHE, placés à proximité du sol (2 cm) ainsi qu'à 20 cm environ afin d'assurer le parallèle avec la position des sondes. De plus, un évaporimètre a été fixé à la cabane abritant le thermo-hygrographe afin d'estimer l'évaporation moyenne sur le site. Les lectures ont été effectuées le matin, à midi et le soir afin d'estimer les variations entre le jour et la nuit. Nous utilisons les valeurs brutes en terme de volume d'eau évacué par unité de temps (ml/h) pour comparer les stations.

1.5.5. Vitesse du vent

Deux anémomètres ont été placés sur les sites d'échantillonnages. Un appareil a été installé le plus près possible du sol (ailettes entre 5 et 10 cm) afin d'estimer le rôle du vent à la surface du sol ou dans la végétation. Le second appareil a été placé à 1,5 m puis à 3 m au-dessus du sol. La lecture a été sporadique mais il est déjà possible de signaler ici que cette mesure est très secondaire vu le choix des journées de beau temps, à l'air très calme.

1.6. METHODE D'ETUDE DE LA CROISSANCE DES SPHAIGNES

La mesure de la croissance des sphaignes a été menée à l'extérieur, sur les sites de recherches selon la méthode de "*la correction de poids du capitulum*" (CLYMO, 1970). Selon CLYMO (1970), il est préférable d'utiliser le terme de croissance plutôt que ceux de productivité et de biomasse car les méthodes employées ne concernent pas toujours les mêmes éléments de matière sèche synthétisée.

Les mesures de croissance qui nous intéressent ici sont intégrées à une vaste recherche sur la productivité primaire des sphaignes. L'aspect complet des résultats et des méthodes de la croissance des sphaignes en fonction des facteurs pédologiques, hydriques et climatiques fait l'objet d'un mémoire (GROSVERNIER, 1996). Nous ne détaillerons donc pas ici les méthodes. Pour cette expérience, nous n'avons utilisé qu'une espèce: *Sphagnum angustifolium* en récoltant un seul écotype sur une seule tourbière (Le Creux-de-L'Epral, récolte en 1991 et 1992).

La méthode de la correction de poids du capitulum permet d'implanter des sphaignes marquées et initialisées en début de saison à une longueur connue (5 cm) et de laisser pousser les individus marqués sans intervenir ni modifier la structure du milieu. La récupération a lieu à l'automne pour la mesure de la croissance. Elle est précise car elle tient compte de la variation de poids des capitulum en cours de saison, ce qui est important pour nous vu les faibles croissances sur certaines stations. Cette méthode a été mise au point pour effectuer des mesures en milieux confinés et contrôlés pour lesquels la récupération des individus en fin de saison ne pose pas de problèmes majeurs. Pour la mesure de croissance, il est nécessaire de nouer à chaque individu un long fil imputrescible afin de permettre une localisation des sphaignes marquées dans la masse sphagnale générale. Outre nos propres recherches, FRANCEZ (1990) a également utilisé cette méthode sur ses sites de terrain. Comme nous, il a rencontré des difficultés pour mesurer une croissance valable.

En 1991, les individus marqués ont été implantés isolément au sein des tapis en place. Seules quelques rares sphaignes ont été retrouvées vivantes en fin de saison. Toutes les autres (30 implantations par stade, trois stades par série) ont été récupérées mortes, en voie de décomposition, complètement noyées dans la matrice initiale qui avait eu une croissance normale.

Dès lors, pour 1992, nous avons adapté la méthode en nous basant sur les expériences menées dans la serre en 1990 et 1991 (GROSVERNIER, 1996.). Pour éviter les différences de vitesses de croissance au début de saison et la domination des individus marqués par le tapis en place, nous avons installé dans le tapis sphagnal la matrice du Creux-de-L'Epral maintenue par un anneau de PVC. A l'intérieur, les sphaignes sont grossièrement coupées à 5 cm. Toute la rondelle est ainsi intégrée au tapis en place en mettant les capitulum au même niveau. Grâce à l'anneau, l'architecture est maintenue si bien qu'il est possible d'y planter une dizaine d'individus soigneusement coupés et marqués d'un fil. Le "stress" initial de croissance est partagé par tous les individus à l'intérieur de l'anneau ce qui leur permet de récupérer plus facilement face à la concurrence des individus en place.

Cette méthode fut un succès puisqu'en fin de saison les tapis étaient uniformes, sans différence de niveaux entre sphaignes en place et rondelles implantées. De plus, grâce à l'anneau resté en position à la base des tiges coupées, il a été aisé de récupérer l'ensemble des individus dans un petit volume connu. Seul inconvénient, majeur pour la mesure de la croissance des phases initiales de la régénération: l'importance des surfaces de coussinets et de tapis déjà régénérés qu'il est nécessaire d'avoir sur le site pour une mise en place optimale des rondelles.

A cause de cet impondérable, il n'a pas été possible d'implanter des rondelles significatives pour la série des gazons de mousses ainsi que pour le stade 3 de la série des touradons. Seuls les marais tremblants, avec les beaux tapis de sphaignes ont permis une implantation aisée. Pour les 4 stations retenues, 3 répétitions ont été possibles, soit 30 individus implantés par stations. Les mesures de croissance concernent l'augmentation de la longueur et du poids (CLYMO, 1970).

Nous n'avons pas effectué de calcul de la production de nos tapis de sphaignes pour exprimer la croissance par unité de surface. Pour ce faire il aurait été indispensable de connaître la densité apparente ou la densité spatiale (nombre d'individus par unité de surface), ce que nous n'avons pas estimé. Les résultats sont donc comparatifs d'un stade à l'autre et d'une série à l'autre et s'expriment en mm pour la longueur accumulée et en mg/10 pour l'augmentation de poids moyen des individus marqués.

1.7. METHODE D'ANALYSES DES RESULTATS

Les méthodes d'analyses des résultats ainsi que les programmes ont été présentés en détail lors de la première partie de ce travail (chap. 1.4 de la typologie). Nous ne reviendrons pas ici sur cet aspect. Des compléments seront apportés si nécessaire au niveau de chaque chapitre.

2. DESCRIPTION DES SERIES

2.1. SERIE DES TOURADONS

La série des touradons se rencontre principalement dans les secteurs de marais ayant subi une exploitation parfois intense de la tourbe (abaissement important du niveau initial du sol). Comme nous l'avons présenté dans la première partie de notre travail (typologie), la recolonisation végétale commence sur un substrat dénudé, couvrant des surfaces suffisamment vastes pour ne pas bénéficier de conditions protectrices particulières (murs de tourbage en particulier). L'eau ne peut pas s'y accumuler en grande quantité ou de manière constante et le niveau du sol est relativement régulier. Le terrain est drainé souvent fortement, sinon directement, du moins immédiatement en bordure, là où les marais ont été transformés en prairies productives. Cette série illustre l'une des deux voies évolutives mises en évidence par la typologie et concerne la dynamique secondaire des milieux terrestres. L'annexe 7 présente les caractéristiques des sites d'échantillonnage de cette série.

Les travaux de GROSVERNIER (1996) confirment les recherches de CLYMO & DUCKETT (1986) quant à la perte du potentiel de régénéralité spontanée sur de tels secteurs. La tourbe non exploitée formant le substrat pour la recolonisation est trop ancienne et dégradée pour conserver des éléments dormants propres à assurer une reprise d'activité végétale. La régénéralion implique donc un apport externe de "graines" (diaspores).

Cette tourbe est colonisée par une végétation herbacée pionnière croissant en touffes éparées et formant des touradons (*Eriophorum vaginatum*, *Molinia caerulea*). Ces groupements sont décrits dans les travaux de POSCHLOD (1988), EIGNER & SCHMATZLER (1991) en relation avec les conditions de régénéralion et de FELDMEYER-CHRISTE (1990) du point de vue de la spécificité végétale.



**Présentation des
trois séries évolutives**

Série des touradons
(Stade 1, Les Pontins)



Série des gazons de mousses
(Stade 2, Le Cachot)



Série des marais tremblants
(Stade 2, Bellelay)

Ils sont également parfaitement mis en évidence dans des situations topographiques analogues par WHITE (1930) pour l'Irlande. Pour le Jura, nous avons identifié cette série dans la grande majorité des marais secondaires visités. Seuls les tourbières fortement boisées ne recèlent pas les stades plus ou moins nets de cette série.

Dynamiquement, la nécromasse tombe autour du touradon qui grandit en induisant une protection du sol. Les sphaignes apparaissent entre les touradons sous forme de petits coussins qui croissent à la fois en superficie et en épaisseur. De plus, une croissance le long du pied du touradon est nettement visible. Ces coussins se joignent et créent un véritable tapis, encerclant les touradons qui sont finalement "submergés" par le tapis, les sphaignes colonisant le centre du touradon lui-même. Stade ultime observé, l'apparition de buttes de sphaignes qui, comme pour la série suivante, se couvrent d'une végétation caractéristique du *Sphagnion magellanicum*.

2.2. SERIE DES GAZONS DE MOUSSES

Les surfaces typologiques assimilables à la série des gazons de mousses ont été identifiées presque exclusivement sur les hauts-marais secondaire élevés (dégradés mais non directement abaissés par l'évacuation de tourbe), en bordure proche de fronts d'exploitation (MATTHEY W. 1971, GEIGER 1980, FELDMEYER-CHRISTE 1990). Les quatre stades de cette série illustrent parfaitement les phases jeunes du *Callunetum* défini par WHITE (1930). Lors des travaux d'extraction, la tourbe était préparée en vue d'une exploitation par l'élimination des strates végétales et le râclage de la surface. Des rigoles de drainage superficielles ont de plus très régulièrement été creusées dans la masse de tourbe. Cependant, sur les surfaces qui nous intéressent, l'exploitation elle-même n'a pas eu lieu si bien que la tourbe laissée en place a conservé son potentiel de régénéralité maximal (CLYMO & DUCKETT 1986, GROSVERNIER, 1996). Sur cette tourbe le stade initial de la recolonisation végétale se concrétise très souvent par l'apparition plus ou moins rapide de petites plages de mousses (*Polytrichum strictum*) en coussinets denses. Ceux-ci finissent par se rencontrer et se fondre en un tapis épais dans lequel, outre quelques laïches, scirpes, molinies ou callunes, apparaissent des sphaignes par petites zones ou individus isolés. Cette série illustre la seconde voie décrite par l'analyse typologique des systèmes terrestres. L'annexe 7 synthétise les caractéristiques des stades décrits.

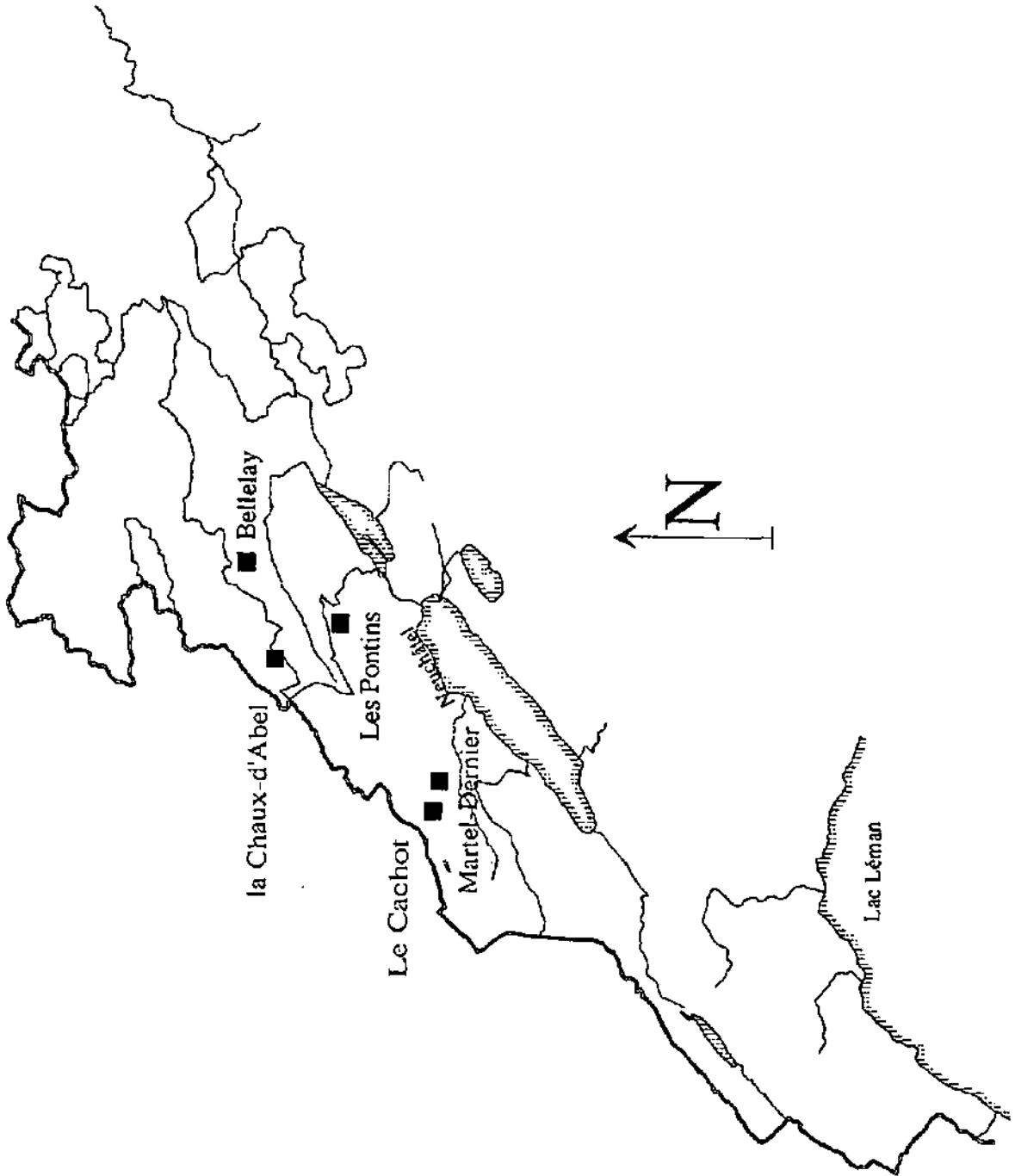
Les sphaignes, profitant des conditions offertes, se développent et envahissent totalement la masse de *Polytrichum* pour finir par la détruire en la dépassant en hauteur. Elles modifient dès lors fondamentalement les conditions du milieu qui peut retrouver ses caractéristiques végétales initiales. Une végétation typique du *Sphagnion magellanicum* s'installe dans le tapis de sphaignes.

Nous avons observé des stades analogues sur tous les hauts-marais jurassiens ayant des vestiges d'exploitations marqués par des murs de tourbage en milieu ouvert.

2.3. SERIE DES MARAIS TREMBLANTS

Cette troisième série illustre le système fonctionnant prioritairement en conditions aquatiques, en liaison avec un plan d'eau libre. Ici, les sphaignes ne bénéficient pas d'un sol, même dégradé, pour s'implanter ou se régénérer.

Figure 21: Localisation géographique des cinq tourbières étudiées dans le cadre des trois successions



Lors des exploitations passées et plus récentes, les tourbières ont dû continuellement évacuer l'eau excédentaire du marais afin d'"assainir" au mieux leurs lieux de travail. Ainsi, de vastes tranchées profondes ont été taillées dans la masse du marais pour collecter les eaux d'écoulement et assécher les surfaces exploitées de part et d'autre.

A l'abandon des exploitations, les creuses (ou fosses) sont restées et l'eau s'est maintenue en permanence à un niveau plus ou moins haut.

Pour cette série, nous décrivons quatre différents stades de recolonisation identifiés dans des fosses. Dans ces structures artificielles, il est assez aisé de trouver toute la panoplie de milieux illustrant la recolonisation végétale, des stades d'eau encore libre, aux groupements du *Sphagnion magellanicum*. Les différents stades évolutifs illustrent bon nombre de groupements de marais de transition, des plus flottants aux plus stabilisés (ROYER *et al.* 1978, 1979, GALLANDAT 1982, GILLET 1982, FELDMEYER-CHRISTE 1990).

L'annexe 7 permet de visualiser les relations entre les différents stades de la série.

2.4. CHOIX DES SITES D'ETUDES

2.4.1. Introduction

Cinq tourbières ont été choisies sur la base de l'analyse des cas de régénération inventoriés durant la saison 1989 sur l'ensemble du Jura. Elles sont localisées sur la figure 20 qui illustre leur position relative à travers l'Arc jurassien.

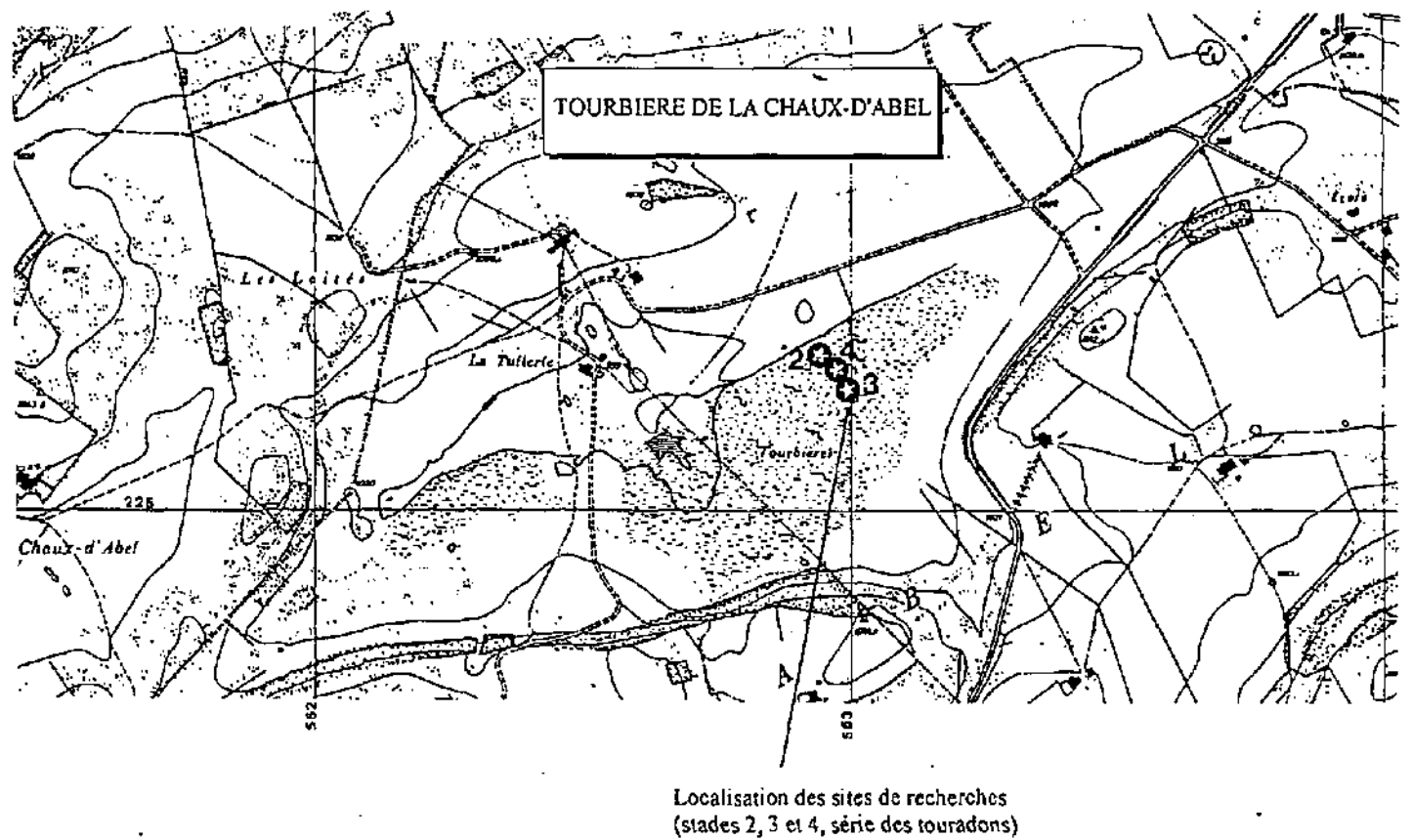
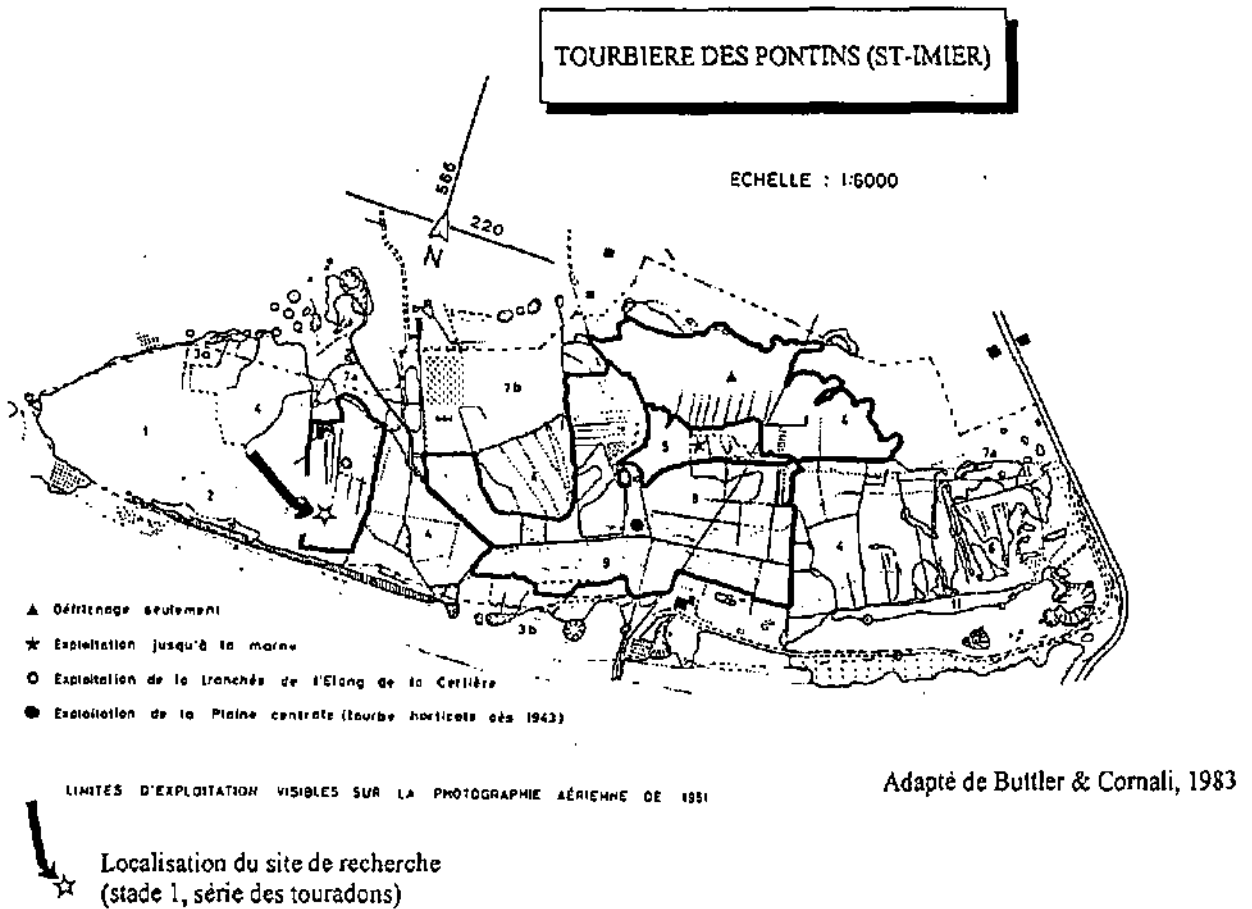
Pour la série des marais tremblants, l'ensemble du phénomène est analysé à la tourbière de Bellelay (canton de Berne). Pour les deux autres séries, la variabilité des méthodes d'extraction a compliqué la mise en évidence du continuum évolutif sur un haut-marais unique. Ainsi, nous avons dû opter pour un choix double pour chaque série. Cependant, une certaine uniformité a été respectée puisque seuls les stades initiaux de chaque série ont été choisis sur un site externe à la description principale. C'est ainsi que la série des touradons est décrite conjointement à la tourbière des Pontins et à celle de la Chaux-d'Abel (canton de Berne). Pour la série des gazons de mousses, le stade initial a été localisé à Martel-Dernier (tourbière des Ponts-de-Martel, canton de Neuchâtel) alors que les trois stades finaux sont décrits à la tourbière du Cachot (canton de Neuchâtel).

Tous ces sites ont fait l'objet de descriptions générales par CHODAT *et al.* (1896), FRUEH & SCHROETER (1904) ou encore LUEDI (1949, 1951, 1962). Plus récemment, dernier grand travail concernant l'ensemble des sites de Suisse, l'Inventaire des hauts-marais et des marais de transition de Suisse (GRUENIG *et al.*, 1986) fournit une cartographie des unités primaires et secondaires rencontrées sur ces objets.

Considérant les nombreux travaux ayant porté sur les hauts-marais jurassiens et décrivant les aspects géologiques généraux et particuliers justifiant la présence de tourbières au coeur d'un massif calcaire et karstique, nous n'y reviendrons pas ici.

Figure 22: Localisation du site de recherches des Pontins (BE)

Figure 23: Localisation du site de recherches de La Chaux-d'Abel (BE)



2.4.2. Le site des Pontins (CN 1124, 565.925/219.675)

L'histoire de l'exploitation et la végétation de la tourbière des Pontins sur Saint-Imier ont fait l'objet de recherches menées par NICOLET (1917), EBERHARDT & KRAEHENBUEHL (1952), BUTTLER & CORNALI (1983). Les sols particuliers du contact naturel, en bordure de notre station, ont été étudiés et caractérisés par GOBAT (1984).

Notre station est située à proximité immédiate de la pinède primaire et intacte, à quelques mètres seulement de la lisière. Sur cette zone, la tourbe a été exploitée entre 1936 et 1951 et le niveau passablement abaissé (environ 1.5 m). Le terrain est en pente assez marquée et collecte les eaux excédentaires de la pinède. Nous avons constaté une érosion assez forte de la tourbe.

Physionomiquement, le secteur se présente en 1991 comme une vaste pente de tourbe nue colonisée par de grands touradons d'*Eriophorum vaginatum* (déjà nettement présents en 1983), régulièrement répartis en laissant de grandes zones ouvertes. Une jeune couverture arborée de *Betula pubescens* (quasi absente en 1983) ferme actuellement nettement le milieu par endroit. La figure 22 localise la station sur le site des Pontins 8 (Cf. photo).

Nous avons choisi cette station pour illustrer le premier stade évolutif de la série des touradons. Ce site ne possède que très rarement des petits coussinets de sphaignes si bien que nous avons pu choisir sans difficulté un ensemble de touradons sans sphaigne pour la description du stade initial de la succession. La présence des sphaignes par endroit témoigne que le potentiel de régénération existe mais que le phénomène est ici retardé.

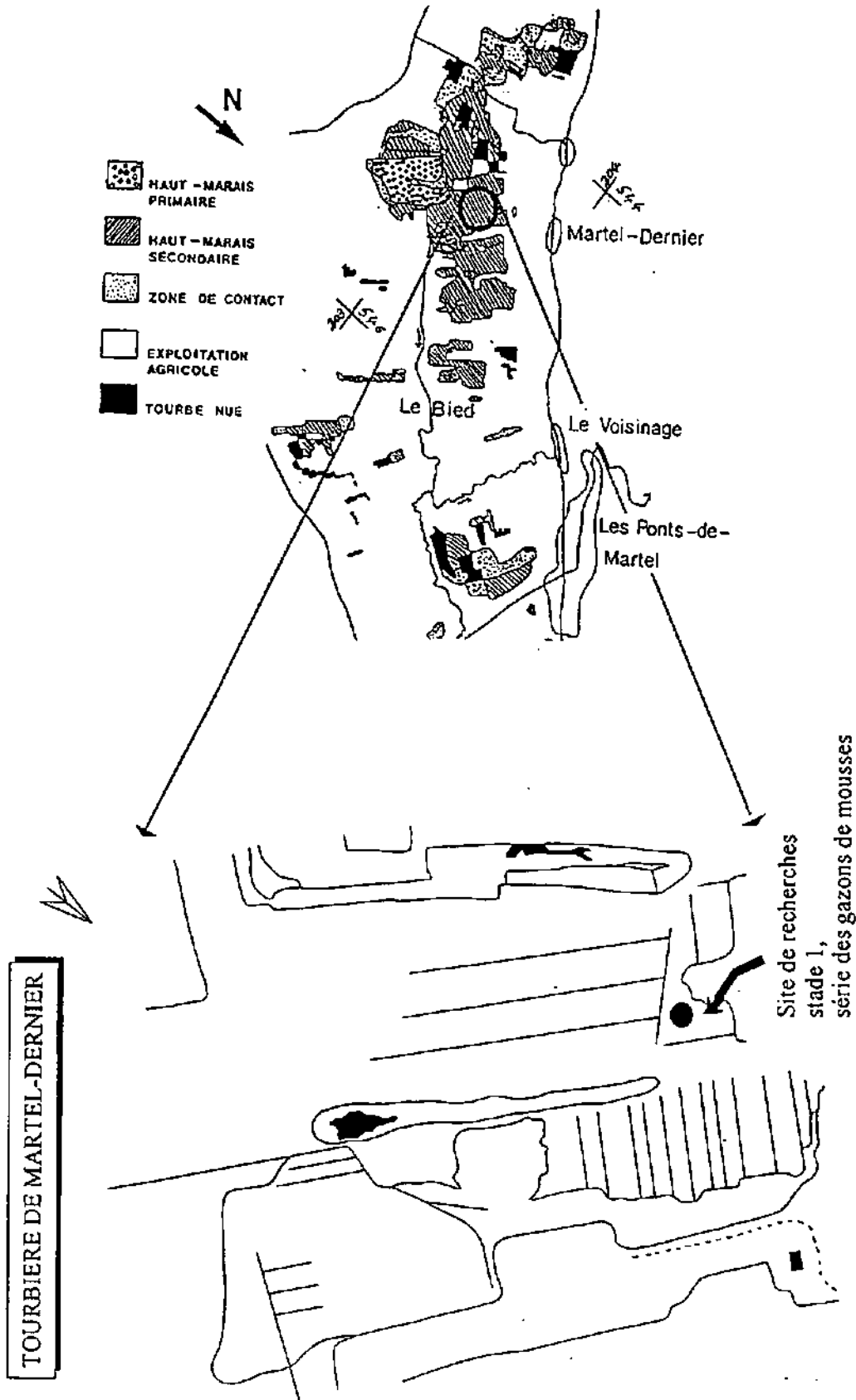
2.4.3. Le site de La Chaux-d'Abel (CN 1124, 563.000/225.325)

Contrairement à certains hauts-marais jurassiens, le site de la Chaux-d'Abel n'a presque pas été étudié en tant que tel. Aucune cartographie phytosociologique n'existe. Ce n'est que dans le cadre de la mise en application de l'Ordonnance fédérale sur les hauts-marais que le bureau NATURA (Les Reussilles, BE) a mis en route en 1992 la cartographie typologique détaillée (GROSVERNIER, *comm. pers.*). Outre ces travaux récents, NICOLET en a fait une description en 1917.

Ce haut-marais a été très fortement perturbé par les exploitations passées et récentes de la tourbe. La recolonisation végétale et la régénération par les sphaignes y sont exceptionnellement rapide puisqu'il semble que l'exploitation ait encore eu lieu jusqu'en 1963 (GRUENIG *et al.*, 1986). Actuellement, il ne reste plus de surfaces de tourbe dénudée. Toute la zone définie par GRUENIG *et al.* (1986) comme végétation de buttes et de gouilles offre actuellement une panoplie incroyablement diversifiée de petits milieux en régénération. Lors de notre recherche typologique, c'est le site qui a fourni le plus de fiches descriptives avec 99 stations.

Parmi ces nombreux faciès de recolonisation, la bordure nord-est est caractérisée par la présence de grandes surfaces à *Eriophorum vaginatum*. Ici, les touradons sont serrés et la marche n'est pas aisée (Cf. photo). De la bordure du marais vers l'intérieur, alors que la surface du sol est presque plate, on passe progressivement d'une présence de sphaignes éparses sous les franges des touradons à une présence continue de la strate sphagnale puis à des buttes accompagnées d'une végétation assimilable à un *Sphagnion magellanicum*. La figure 23 illustre la position des trois stations que nous avons installées sur ce site pour décrire et étudier les stades les plus avancés de la série des touradons.

Figure 24: Localisation du site de recherches de Martel-Dernier (NE)



2.4.4. Le site de Martel-Dernier (CN 1163, 544.630/203.420)

Le site choisi est situé sous le hameau de Martel-Dernier (commune des Ponts-de-Martel) à la limite secondaire du vaste complexe tourbeux se prolongeant vers le sud en direction du Bois-des-Lattes. Initialement, la tourbière se prolongeait vers le bord de la vallée, en direction des fermes, sur 200 mètres supplémentaires, en présentant un amincissement naturel du sol tourbeux. Depuis 200 à 250 ans, la tourbe a été exploitée et la limite de la tourbière déplacée vers le centre de la vallée pour laisser place à des terrains agricoles, exploités aujourd'hui intensivement.

La figure 24 illustre en détail la position géographique de notre site d'études.

Pendant la Seconde Guerre Mondiale, la limite générale du haut-marais n'a pas bougé beaucoup à l'emplacement même de notre station, alors qu'à proximité immédiate, de vastes exploitations ont créé des saignées au coeur même du massif tourbeux. Sur le site d'études lui-même, aucune exploitation n'a eu lieu mais la physionomie du terrain, jusque loin en avant sur la tourbière, a été profondément modifiée par la préparation de la zone pour l'exploitation. Les strates arborescentes, arbustives, chaméphytiques herbacées et muscinales ont été totalement éliminées et râclées dans la zone de bordure. Même si le niveau de tourbe n'a pas été abaissé, le sol a été abandonné totalement dénudé à l'arrêt des travaux aux environs de 1945.

Le front d'exploitation, situé quelques mètres en deçà du site de recherches, initialement vertical, s'est peu à peu éboulé provoquant une légère érosion en surface, ce qui a ralenti la recolonisation végétale sur la bordure du front de coupe.

La physionomie de la zone est actuellement celle d'une surface ouverte encore nettement dénudée. Quelques plages de *Polytrichum strictum*, compactes et bien individualisées alternent avec des pousses d'*Eriophorum vaginatum* et de *Scirpus caespitosus*. Plus généralement, *Calluna vulgaris* commence une apparition modeste alors que les seuls pieds de *Rhynchospora alba* connus dans la région se plaisent en bordure de cette surface.

Cette zone a été étudiée sous divers aspects ces dernières années. Outre son intégration à la carte de végétation de MATTHEY Y. (1984) et une analyse simple de la tourbe, MULHAUSER (1988) y a décrit la faune invertébrée caractéristique. Plus avant, PEDROLI (1975) y a étudié la biologie du Pipit farlouse (*Anthus pratensis*).

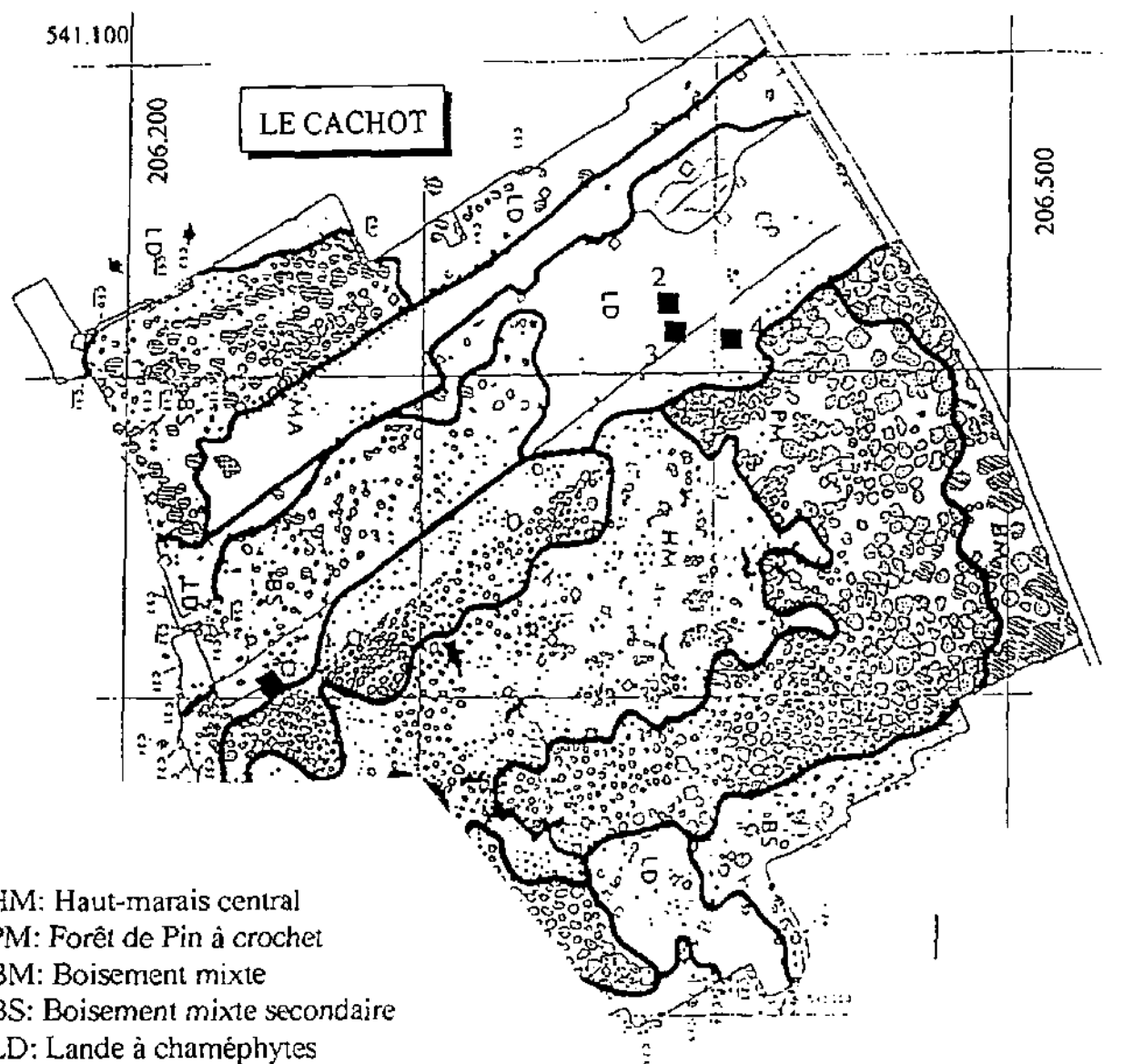
2.4.5. Le site du Cachot (CN 1143, 541.065/206.390)

La tourbière du Cachot a fait l'objet de très nombreuses études faunistiques et écologiques (MATTHEY W. 1964, 1965, 1971, AUROI 1975, GEIGER 1980, BASSET 1985, BORCARD 1988).

La figure 25 permet de localiser en détail nos stations de recherches.

De nombreux renseignements historiques, climatiques et hydrologiques ont été consignés dans les études précitées. Ils nous permettent de savoir qu'en 1925 toute la frange ouest de l'actuelle pinède primaire a été défrichée et le sol mis à nu par râclage. Une préparation identique à celle de Martel-Dernier a été faite en vue d'une exploitation qui n'a jamais eu lieu. Contrairement aux bordures du marais de Martel-Dernier, le front d'exploitation ne se prolonge pas ici par des terrains agricoles mais par une vaste creuse (fossé Pochon) inondée et en pleine régénération.

Figure 25: Localisation du site de recherches du Cachot (NE)



HM: Haut-marais central
 PM: Forêt de Pin à crochet
 BM: Boisement mixte
 BS: Boisement mixte secondaire
 LD: Lande à chaméphytes
 MA: Marais abaissé inondable

adapté selon Vernier 1992, bull. SNSN 115, p.65

■ Site de recherches
 stade 2,3 et 4
 série des gazons de mousses

541.400

Des gazons de mousses (*Polytrichum strictum*) ont totalement recolonisé les sites que nous avons choisi pour illustrer cette série. Trois stades, très proches géographiquement, sont décrits et analysés ici. Contrairement au stade initial de Martel-Dernier, de jeunes arbres recolonisent déjà cette surface et la strate chaméphytique est elle-aussi bien développée. Ces cicatrisations, outre les sphaignes étudiées en détail, attestent d'une évolution plus avancée qu'à Martel-Dernier.

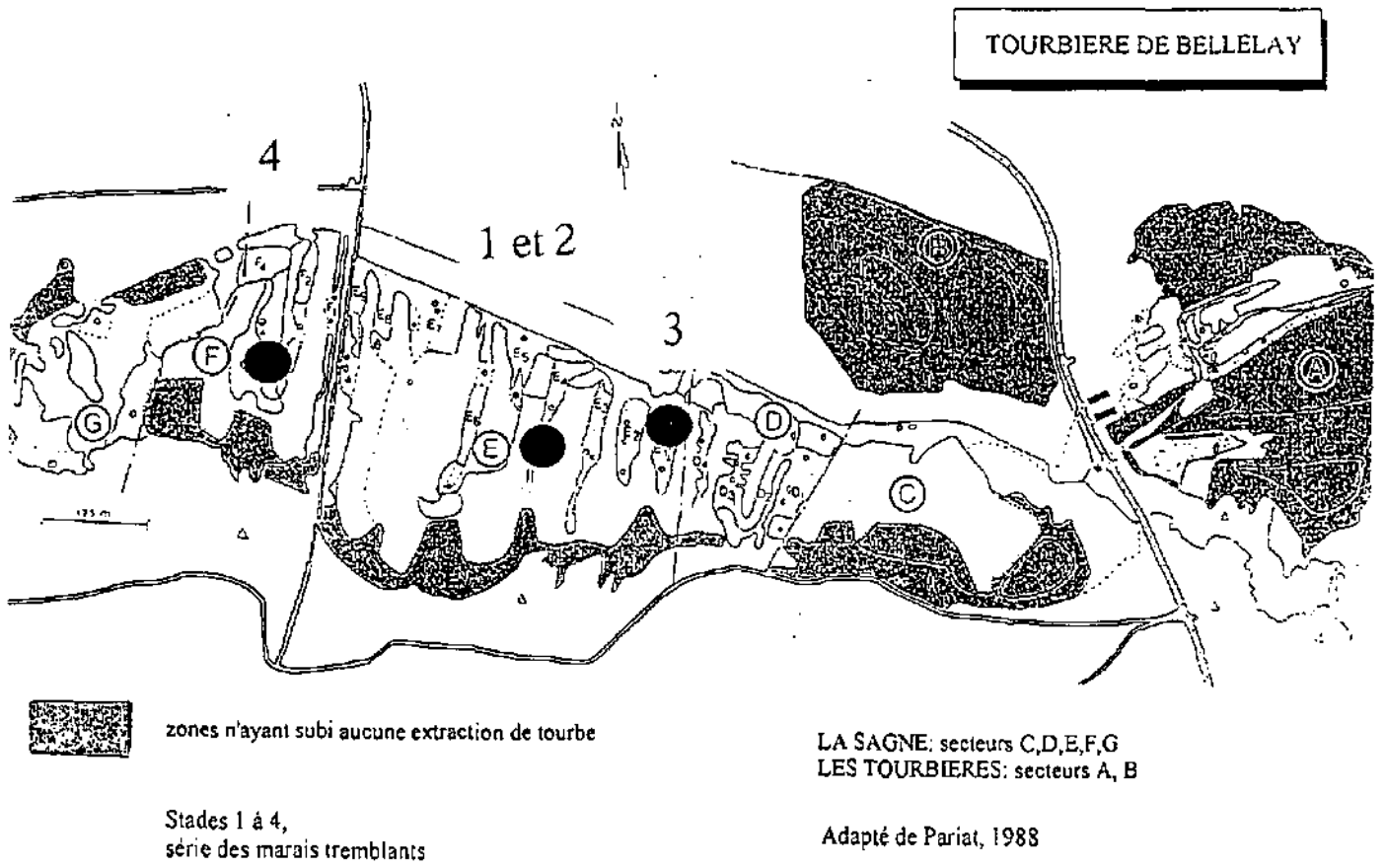
2.4.6. Le site de Bellelay (CN 1105, 579.400/233.950 et 579.575/233.850)

Le secteur de marais se situant à l'ouest de la route cantonale peut être considéré comme totalement secondaire. L'exploitation y a été extrêmement intense (figure 26) et FRUEH & SCHROETER indiquent avoir rencontré "un désert de parois et d'excavations de tourbe" lors de leur visite de 1895.

Fort de cette information, il est possible de tirer un bilan du dynamisme de la régénération en une centaine d'années. Comme nous l'indiquent les travaux de PARIAT (1988) et de ROBERT (1990), la végétation et la faune caractéristiques des marais de transition et des hauts-marais ont totalement recolonisé les creuses abandonnées après les exploitations. Ces fosses sont caractéristiques de ce secteur du site. Il en existe toute une série, placées côte à côte perpendiculairement à l'axe principal de l'objet, et conduisant les eaux d'écoulement vers le ruisseau. Grâce à un bourrelet de marnes faisant barrage dans la partie basse, les eaux ont été maintenues dans les fosses. Les travaux du bureau NATURA (1988) sur l'hydrologie du site et les écoulements ont montré que cette partie du haut-marais de Bellelay est une tourbière de pente, orientée à la fois dans l'axe sud-nord et ouest-est. Ces écoulements ont une influence majeure sur la nature et la dynamique de la régénération qui a pu se dérouler dans ces fosses. Les eaux de ruissellement, provenant directement des pentes calcaires du Montbautier, peuvent s'écouler directement dans les fosses de tourbage car le fonctionnement karstique de bordure ne permet pas une évacuation assez rapide des eaux de surface et la masse de tourbe restant en amont n'est pas suffisamment étanche pour isoler la partie abaissée de la tourbière. Actuellement donc, le marais en régénération est de type minérotrophe, avec une végétation caractéristique des milieux de transition.

Un chemin agricole sépare le site en deux. La figure 26 montre que nous avons choisi les trois premiers stades évolutifs à l'est de ce chemin, dans le secteur étroit de la tourbière, alors que le quatrième stade a été placé à l'ouest du chemin dans un secteur mieux protégé des eaux d'écoulement. L'évolution y est particulièrement avancée et montre déjà un très bel exemple de *Sphagnion magellanici* issu du comblement d'une fosse d'exploitation.

Figure 26: Localisation du site de recherches de Bellelay (BE)



3. DESCRIPTION DE LA VEGETATION ETUDIEE

INTRODUCTION

Notre étude de la végétation n'est pas basée sur une approche phytosociologique classique. De nombreux travaux ont déjà décrit la végétation des hauts-marais jurassiens dans le détail, si bien que nous n'avons pas retravaillé cet aspect. Parmi les plus récents, et pour les tourbières que nous avons étudiées, nous pouvons citer les travaux de JORAY (1942), EBERHARDT & KRAEHENBUEHL (1952), RICHARD (1961), MATTHEY W. (1964, 1965), ROYER *et al.* (1978, 1979), GEIGER (1980), GILLET (1982), BUTTLER & CORNALI (1983), MATTHEY Y. (1984), FELDMEYER-CHRISTE (1987, 1990). Aussi, pour notre part, aucun relevé classique de végétation n'a été effectué dans le cadre de nos travaux.

La description de la végétation est donc essentiellement illustrative, dans le but de mettre en évidence les différences significatives entre les divers stades étudiés. Plus que la flore, c'est la **structure des milieux** qui présente pour nous un intérêt majeur, aussi bien quant à la répartition spatiale des espèces qu'en fonction de leur développement vertical. Seule la végétation de la série des creuses a fait l'objet de descriptions floristiques sur la base des transects longs.

3.1. METHODE

Les méthodes de chaque niveau de description de la végétation ont été décrites au chapitre 1.

3.2. LA SERIE DES TOURADONS (*Eriophorum vaginatum*)

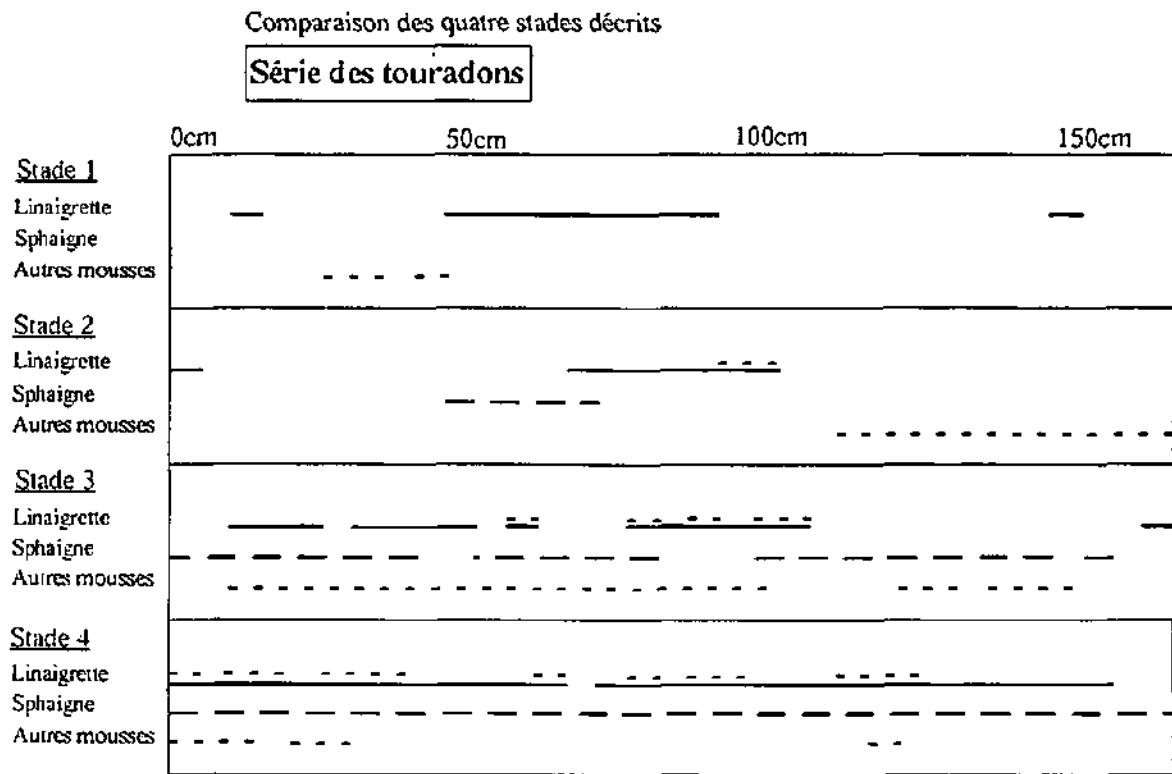
3.2.1. La structure verticale de la végétation liée au profil pédologique

Les résultats sont illustrés en détail sur les figures 36, 37, 38 et 39, en liaison avec les quatre profils pédologiques. Ils sont synthétisés à la figure 27.

Nous caractérisons essentiellement la série par la présence de nombreux touradons d'*Eriophorum vaginatum*, répartis assez uniformément sur les terrains étudiés. La surface du terrain est ainsi régulièrement bosselée avec, au niveau de chaque touradon, l'éventail tridimensionnel des feuilles et des tiges annuelles portant les caractéristiques "plumets" de graines blancs. Autour de chaque touradon, s'étale en cercles réguliers la litière de tiges et de feuilles des années antérieures, plaquée au sol par la pression de la couche de neige hivernale. Chaque profil pédologique a été choisi pour couper tout ou partie de deux touradons afin de visualiser la position et l'importance relative de ces derniers et des coussinets de sphaignes.

Sur le premier stade, à la tourbière des Pontins, les touradons sont assez espacés pour maintenir des secteurs ouverts entre les plages de litière. L'eau y ruisselle facilement et le soleil peut atteindre aisément la tourbe restée dénudée. Le secteur étudié ne présente pas de sphaigne et seules quelques petites taches de *Dicranum scoparium* sont identifiables au pied d'un touradon. Néanmoins, la régénération est possible sur ce site puisqu'en bordure du secteur d'études, nous avons observé plusieurs coussinets de sphaignes, en relation avec les touradons d'*Eriophorum va-*

Figure 27: Répartition proportionnelle des espèces végétales principales le long des profils pédologiques



ginatum. Les figures 27 et 36 permettent une visualisation de la répartition longitudinale des espèces principales et de la structure verticale de la végétation de ce stade initial.

A la tourbière de La Chaux-d'Abel, nous avons décrit les stades 2 à 4. Les touradons sont nettement plus serrés qu'aux Pontins ce qui provoque une couverture quasi totale du sol par les différentes masses de nécromasse qui se chevauchent d'un touradon à l'autre.

Le deuxième stade permet de visualiser la position d'implantation des sphaignes et la localisation des premiers coussinets structurés. Comme le montrent les figures 27 et 37, les coussinets sont immédiatement appliqués au pied du touradon, dans la petite cavité maintenue ouverte entre la litière tombant du sommet du touradon, sa bordure verticale et le sol. Ce stade présente la phase initiale de la régénération, avec des plages de sphaignes très petites et totalement isolées les unes des autres. Du point de vue spécifique, c'est *Sphagnum fallax* Klinggr. qui a été identifié le long du profil.

Le troisième stade offre une image structurelle identique quant à la répartition d'*Eriophorum vaginatum*. Plus évolué, il présente des coussinets de sphaignes plus épais, ayant une étendue latérale nettement plus grande. Là, le promeneur met le pied sur de petits tapis de sphaignes, issus de la coalescence des premiers coussinets. La tourbe nue est plus rare et ce, d'autant plus que d'autres mousses et quelques herbacées s'implantent entre et dans les plages de sphaignes. Sous la nécromasse, grâce à l'épaisseur croissante de la masse de sphaignes et à l'appui offert par la structure du touradon lui-même, les sphaignes peuvent de plus en plus prendre pied sur la partie sommitale de la butte. Du point de vue des plantes compagnes, nous avons noté dans ce stade la présence de *Potentilla erecta* et de *Polygonum bistorta*. Le sommet des touradons est régulièrement colonisé par *Pleurozium schreberi*, parmi lequel les sphaignes apparaissent par individus isolés. Pour les sphaignes, une seule espèce est présente à ce stade: *Sphagnum fallax*. Les figures 27 et 38 illustrent la répartition de ces espèces autour et sur les touradons.

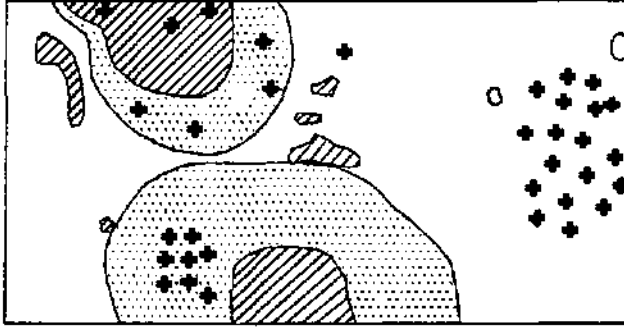
Le quatrième stade, bien que distant du précédent d'une vingtaine de mètres seulement, présente une physionomie totalement différente. *Eriophorum vaginatum* est toujours bien présente sur la surface mais ses tiges et ses feuilles apparaissent à travers un tapis continu de sphaignes compact amorçant une structure de replats et de buttes. Grâce au profil pédologique, il est possible de mettre en évidence l'existence des touradons d'*Eriophorum vaginatum*, dont les souches sont littéralement submergées par la masse du tapis de *Sphagnum fallax*. L'aspect général des "buttes" est donc donné par la structure des touradons en parallèle à une épaisseur plus importante de la masse de sphaignes. Attestant la croissance nouvelle de la tourbière, deux couches de "litière" distinctes sont identifiables:

- La nécromasse de tiges et de feuilles d'*Eriophorum vaginatum*, directement posée sur la tourbe dégradée
- Une couche de sphaignes mortes en cours de tourbification, mélangée à la litière récente d'*Eriophorum*.

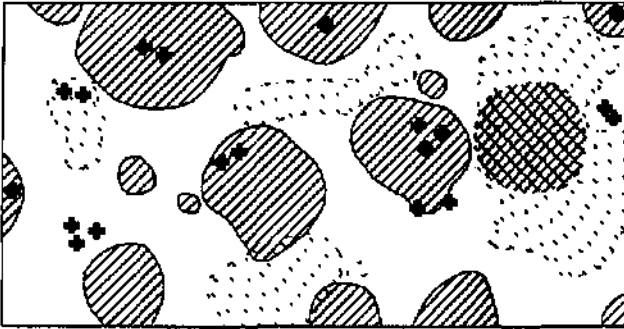
De plus, nous retrouvons *Potentilla erecta* et *Polygonum bistorta*, accompagnées d'un pied de *Molinia caerulea* et d'un autre de *Nardus stricta*. Pour les mousses, nous avons identifié *Aulacomnium palustre* et *Polytrichum strictum* (une seule présence). Les figures 27 et 39 permettent une visualisation de cette structure végétale par la répartition longitudinale des espèces principales et sur le plan vertical.

Figure 28: Projection plane de la végétation. Série des touradons

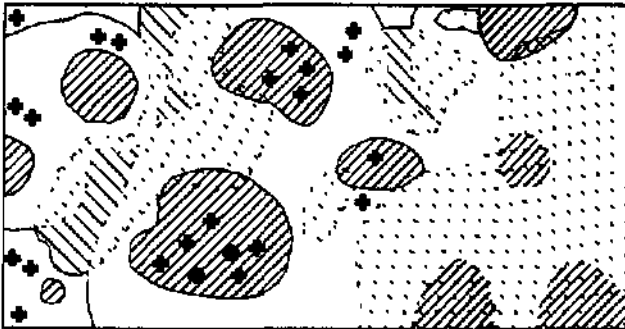
Stade 1



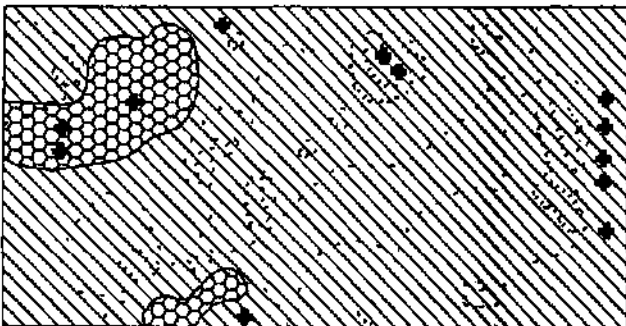
Stade 2








Stade 3



Stade 4



Légende

-  Souche de *Eriophorum vaginatum*
-  Litière de *Eriophorum vaginatum*
-  Coussinet de sphagnes
-  Autres mousses isolées
-  Sphagnes évoluant en jeune butte

Les structures sont superposées.
 Les lignes pointillées illustrent
 les structures situées en profondeur
 et recouvertes
 (échelle semi-quantitative)

3.2.2. La structure horizontale de la végétation

Les illustrations de la structure horizontale de la végétation au moyen de projections planes confirment l'évolution spatiale des coussinets de sphaignes. La figure 28 présente cette évolution par l'aspect graphique et la comparaison directe des 4 stades. Elle montre l'évolution relationnelle entre *Eriophorum vaginatum* (positions des souches, des tiges et des feuilles) et les masses de sphaignes.

La dynamique de colonisation du milieu par les sphaignes s'exprime de manière totalement similaire à celle décrite par les coupes du profil pédologique. Grâce à l'aspect en plan, quelques informations complémentaires peuvent être mises en évidence.

Au niveau du deuxième stade déjà, certains coussinets isolés sont constitués par *Sphagnum rubellum*. Avec *Sphagnum fallax*, nous avons donc identifié deux espèces au moins pouvant initier une régénération sphagnale.

Au niveau du quatrième stade, l'aspect "replats et buttes" induit par le valonnement des touradons recouverts de sphaignes doit être précisé. En effet, nous avons observé plusieurs véritables petites buttes à sphaignes, indépendantes des parties sommitales des touradons. Il y a donc bien **début de structuration en buttes par les sphaignes**. Du point de vue des espèces herbacées (non illustrées sur la figure 28), *Carex nigra*, *Festuca rubra*, *Viola palustris*, *Luzula campestris* et *Epilobium palustre* ont été notés sur la surface recensée en plus de *Polygonum bistorta* et *Molinia caerulea* déjà notées sur le profil. Elles sont présentes régulièrement en petit nombre sur l'ensemble de la surface.

3.2.3. Caractéristiques végétales de la série

Par rapport aux résultats typologiques généraux, les stades illustrant la série des touradons présentent le tout début des phases initiales de la régénération. Les stations décrites par la typologie mettaient en évidence l'apparition de chaméphytes immédiatement après la création des buttes à sphaignes. Sur le site de La Chaux-d'Abel, de nombreux types de régénération expriment ces stades. Ils existent en grand nombre et côtoient géographiquement parfaitement ceux que nous avons choisi de décrire. Notre sélection a été dictée par la volonté de maintenir une unité physiologique au niveau des touradons d'*Eriophorum vaginatum* et de suivre la colonisation de ces structures par les sphaignes, jusqu'à la fermeture complète du tapis de mousses.

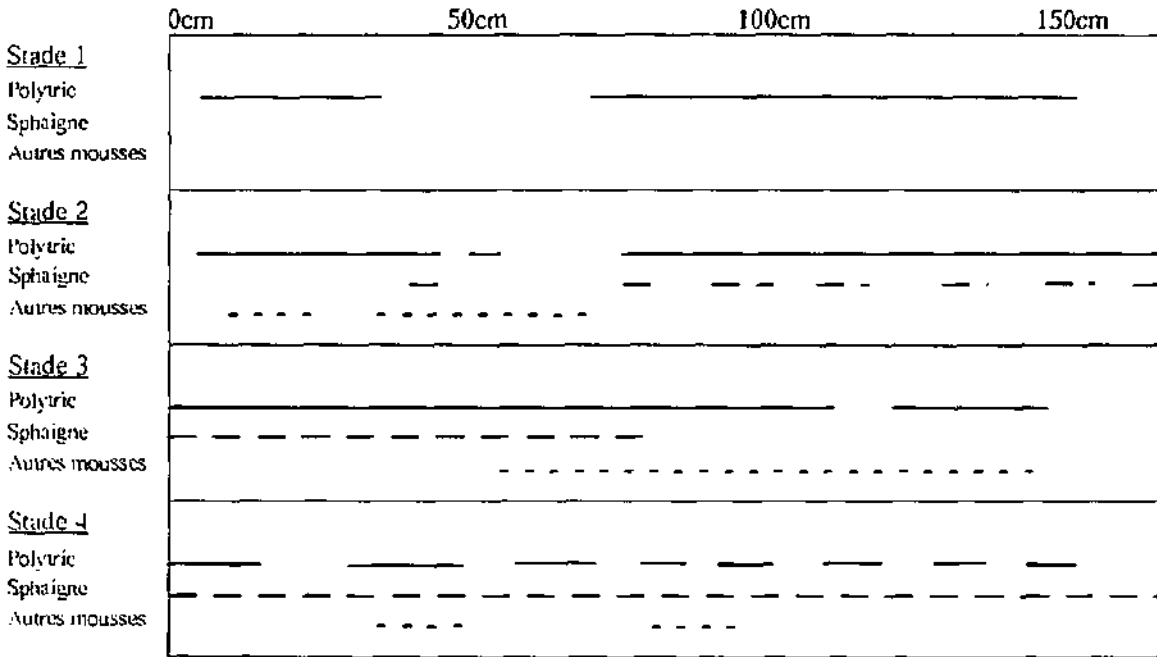
Les stades à *Eriophorum vaginatum* et sphaignes ont été décrits par de nombreux auteurs et ce, dans toute l'Europe (HUECK 1928, KRISAI 1965, JULVE 1983, DIERSSEN & DIERSSEN 1984, BERTRAM 1988). Ces groupements couvrent parfois de très importantes surfaces (SCHUMACKER & ZUTTERE 1980, FELDMEYER-CHRISTE 1987, 1990). KRISAI (1965) décrit l'association de l'*Eriophoro vaginati-Sphagnetum recurvi* et BERTRAM (1988) rattache ces relevés à un *Eriophoro angustifolii-Sphagnetum fallacis eriophoretosum vaginati*. Comme l'indique également FELDMEYER-CHRISTE (1990), nous estimons que les groupements jurassiens n'offrent pas suffisamment d'espèces caractéristiques pour pouvoir être élevés au rang d'association.

Tous les auteurs décrivent ces groupements comme colonisateurs primaires de marais perturbés par les exploitations de la tourbe. Le groupement décrit comme "*Eriophorum vaginatum*-

Figure 29: Répartition proportionnelle des espèces végétales principales le long des profils pédologiques

Comparaison des quatre stades décrits

Série des gazons de mousses



Sphagnum recurvum-Gesellschaft" par HUECK en 1928 est considéré par OBERDORFER (1977) comme une phase du *Sphagnetum magellanicum*; KAESTNER & FLOESSNER (1933) l'intègrent également à cette dernière association. Ces considérations corroborent nos résultats typologiques quant à une voie possible de l'évolution dynamique des marais secondaires ouverts, par la série des touradons d'*Eriophorum vaginatum*, vers le complexe des replats et buttes caractéristiques.

3.3. LA SERIE DES GAZONS DE MOUSSES (*Polytrichum strictum*)

3.3.1 La structure verticale de la végétation liée au profil pédologique

Nos résultats sont présentés graphiquement sur les profils des figures 40, 41, 42 et 43 ainsi qu'au moyen de la figure 29.

Cette série, décrite en détail au chapitre 2.2., est caractérisée par l'abondance relative de *Polytrichum strictum* et des sphaignes (*Sphagnum capillifolium* var. *rubellum* (Wils.) A. Eddy, *Sphagnum flexuosum* Dozy & Molk. et *Sphagnum magellanicum* Brid.). Le sol est donc ici couvert d'un feutrage régulier de mousses denses avec, pour le premier stade, de vastes secteurs de tourbe nue et pour le quatrième stade, de belles grandes buttes à sphaignes. La marche est aisée sur un sol mou et à travers un environnement relativement ouvert. Chaque profil coupe un gazon de *Polytrichum strictum*. Les stades ont été choisis afin de mettre en évidence l'apparition des sphaignes et leur mode d'implantation dans le gazon.

Le premier stade, situé sur la bordure élevée du marais de Martel-Dernier, présente la physionomie caractéristique des bordures immédiates d'anciens murs d'exploitation. Le mur étant un peu éboulé, l'érosion maintient des plages importantes de tourbe nue sur lesquelles s'implantent avec peine de petites zones de *Polytrichum strictum* et quelques pieds d'*Eriophorum vaginatum* et de *Calluna vulgaris*. Sur la surface prospectée, il n'y a aucune sphaigne. La structure verticale est pour ainsi dire inexistante vu le très faible développement des gazons de mousses en épaisseur et la vitalité réduite des plantes supérieures.

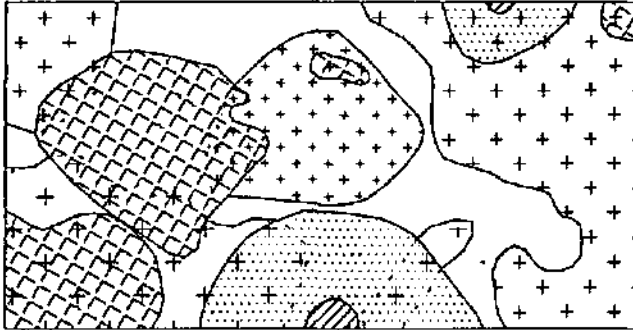
Dès le deuxième stade, la série est décrite à la tourbière du Cachot. Le gazon de *Polytrichum strictum* couvre l'entier des zones décrites, en offrant une diversité quant à la densité des individus recensés en relation avec les sphaignes.






Ainsi, le deuxième stade est largement dominé par *Polytrichum strictum* qui forme un gazon assez dense de 3 à 6 cm d'épaisseur (partie vivante des plantes) dans lequel se développent aussi bien des tiges isolées d'*Aulacomnium palustre*, de *Pleurozium schreberi* que de *Sphagnum fallax*. Les structures vivantes prolongent un feutrage assez dense de tiges feuillées mortes, "couchées" sur une tourbe noire dégradée. Comme le montrent la figure 29 et le profil de la figure 41, les sphaignes se trouvent un peu partout dans le gazon mais sont dominées par les tiges feuillées du Polytric. Le sommet de ces dernières dépasse de 1 cm environ le capitulum des sphaignes. Cette dominance verticale exprime, principalement par la couleur qui contraste entre le vert franc et lumineux des périodes humides et le vert sombre presque noir des périodes sèches, la physionomie du milieu.

Figure 30: Projection plane de la végétation. Série des gazons de mousses

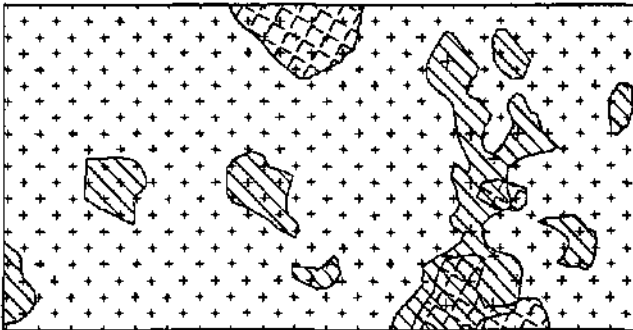
Légende

Stade 1



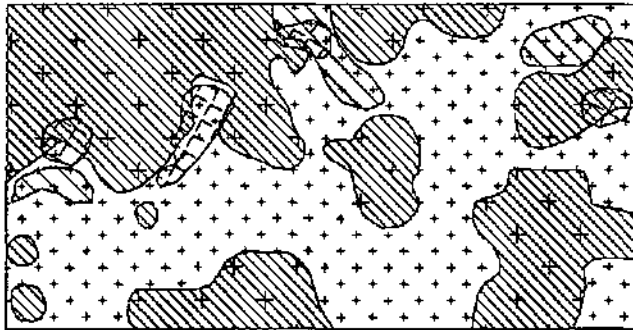
-  Souche de *Eriophorum vaginatum*
-  Litière de *Eriophorum vaginatum*
-  Ericacées
-  *Polytrichum alpestre*
-  Coussinet de sphaignes

Stade 2



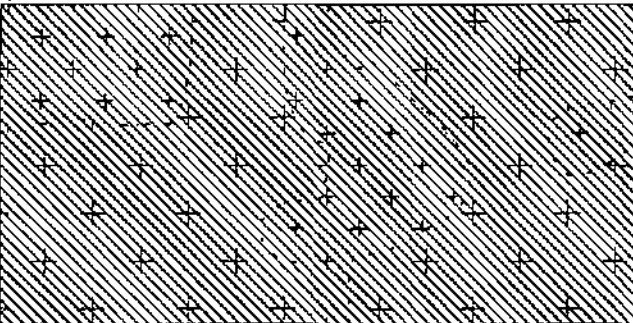
Les structures sont superposées.
Les lignes pointillées illustrent les structures situées en profondeur et recouvertes

Stade 3



La densité des trames renseigne sur l'abondance et le recouvrement relatif des structures et espèces illustrées (échelle semi-quantitative)

Stade 4 (Couverture d'Ericacées sur toute la surface, non illustrée)



Le troisième stade est directement contigu au deuxième. Il s'en distingue par l'augmentation du recouvrement des sphaignes qui présentent une régularité de présence nettement meilleure. Les autres mousses compagnes de *Polytrichum strictum* sont également plus abondantes si bien que la dominance du Politruc est déjà moindre. La figure 29 et le profil de la figure 42 illustrent les recouvrements relatifs des différentes espèces majeures et leur organisation spatiale.

Le quatrième stade, bien que situé à quelques mètres des deux précédents, offre une physionomie assez différente (fig. 29 et profil de la fig. 43). Les sphaignes sont ici nettement dominantes et donnent au milieu son aspect général. De plus, contrairement aux deux autres stades, les sphaignes commencent à s'élever en buttes. Dans le tapis de sphaignes, l'épaisseur de la masse végétale vivante atteint 10 cm et les tiges feuillées de *Polytrichum strictum* maintiennent le léger dépassement mis en exergue. Ici, les plantes caractéristiques du centre dynamique du haut-marais commencent à réapparaître avec, au niveau du profil, *Vaccinium oxycoccos* et *Betula nana*. Ce quatrième stade a été décrit dans une zone présentant des buttes à sphaignes très peu développées et une couverture chaméphytique faible afin de maintenir au mieux l'unité physionomique des stades précédents et assurer une comparaison optimale pour les autres domaines étudiés (micrométéorologie en particulier).

3.3.2 La structure horizontale de la végétation

Comme pour la série des touradons, nous avons extrait les projections planes des espèces principales sur une figure synthétique (fig. 30) afin de visualiser les changements de structures horizontales par les modifications de répartition des espèces muscinales.

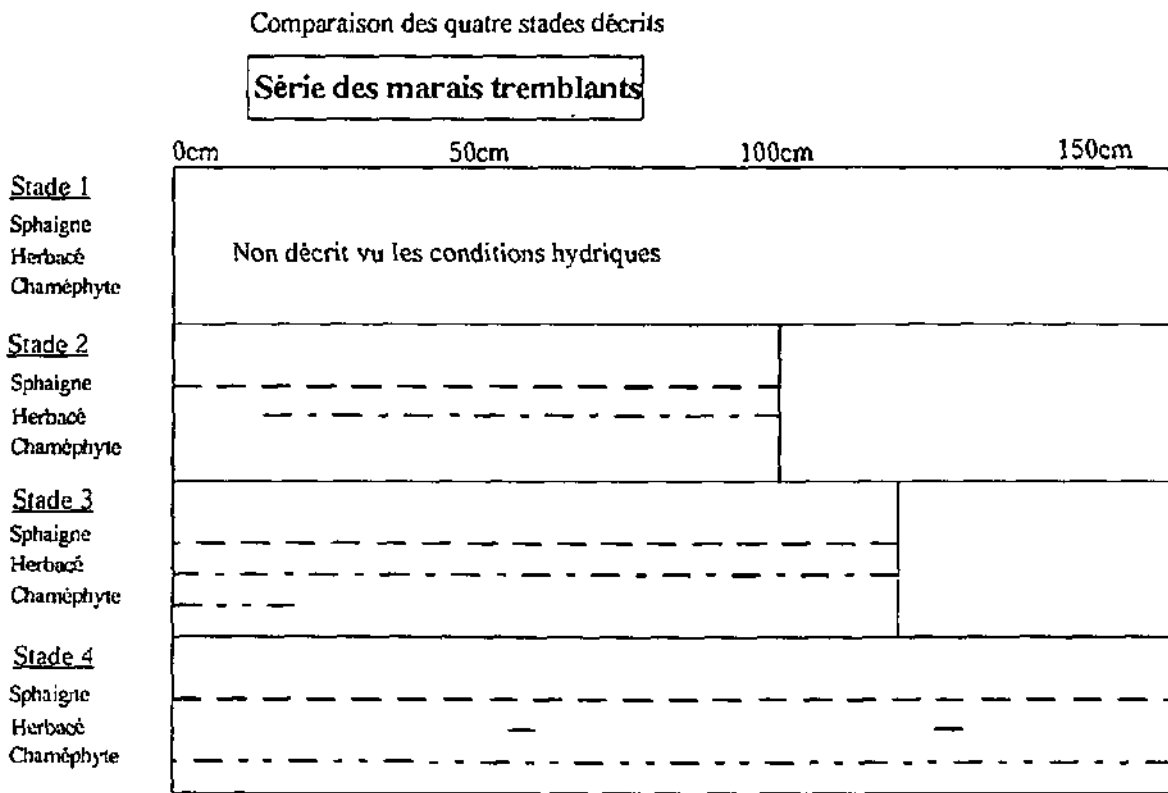
Comme pour la série des touradons, le changement de dominance entre les espèces est parfaitement mis en évidence par la comparaison des structures horizontales.

Le premier stade montre que la colonisation d'un milieu nu par *Polytrichum strictum* se fait par de petites plages indépendantes les unes des autres, dans lesquelles la densité des tiges feuillées est variable. L'absence de sphaigne et la présence de tourbe nue contrastent avec les stades suivants. Dès le deuxième stade, le milieu est totalement fermé par un dense gazon muscinal. L'apparition des sphaignes dans le gazon se fait par têtes isolées, irrégulièrement réparties et montrant déjà des centres de densification. Le troisième stade concrétise parfaitement cette densification par zones puisque l'on peut mettre en évidence plusieurs secteurs où *Sphagnum* est dominant en nombre sur *Polytrichum*. Le milieu présente l'aspect d'une mosaïque variant selon la densité relative des deux genres. Le quatrième stade confirme la dominance spatiale de *Sphagnum* au détriment de *Polytrichum*. Avec la présence d'un tapis continu de sphaignes, la modification des conditions écologiques du milieu s'exprime par l'augmentation de la diversité spécifique sphagnale et par la présence de buttes à sphaignes, avec *Sphagnum capillifolium* var. *rubellum*, *Sphagnum magellanicum* en compagnie de *Sphagnum flexuosum*.

3.3.3. Caractéristiques végétales de la série

Par comparaison avec les résultats de l'analyse typologique, les stades choisis pour cette série montrent clairement l'évolution complète du milieu par la constitution de coussinets de sphaignes puis de buttes et par l'apparition de la végétation caractéristique du haut-marais dynamique. Contrairement à la série des touradons, la possible régénération des tourbières perturbées par cette succession de milieux ne fait pas l'unanimité dans les travaux consultés. Les stades initiaux de notre série sont assimilés à des faciès pionniers de recolonisation de tourbe nue (WICKY, 1988) et

Figure 31: Répartition proportionnelle des espèces végétales principales le long des profils pédologiques



aux groupements à Polytrics et Lichens (HUECK 1925, KAESTNER & FLOESSNER 1933, GIES 1973, KAULE 1974 et FELDMEYER-CHRISTE 1990). JENSEN (1961) indique que les lichens caractéristiques du groupement disparaissent avec une augmentation de l'humidité du sol. Tout comme FELDMEYER-CHRISTE (1990), GEIGER (1980) considère ces groupements comme une réponse "négative" du haut-marais, dont ces milieux sont révélateurs de stades de dégradation avancés et de l'arrêt de croissance de la tourbière. Par contre BERTRAM (1988), signale l'existence de deux associations parfaitement assimilables aux deux stades finaux de notre série (le *Pleurozio-Sphagnetum nemorei* J. Tx. apud Preising *et al.* 1984 et le *Erico-Polytrichetum stricti* (R. Tx. 1958) J. Tx. apud Preising *et al.* 1984). Cet auteur caractérise son *Erico-Polytrichetum stricti* par analogie avec le "*Polytrichum strictum*-Bulten" décrits par HUECK (1925) et indique clairement que ces associations se développent sur des surfaces de tourbe exploitée et sont des groupements de régénération. DIERSSEN & DIERSSEN (1984) décrivent des formations proches de nos stades évolués avec la présence de *Sphagnum magellanicum* et *S. capillifolium* var. *rubellum* comme étant assimilable à un *Sphagnetum magellanicum cladionetosum arbusculae*. Notre stade final est également assimilable au stade à *Vaccinium uliginosum* décrit par FELDMEYER-CHRISTE (1990) bien qu'elle associe ce groupement également aux tourbières dégradées.

Comme nous l'avons déjà indiqué, nous considérons que l'approche traditionnelle des groupements de landes des tourbières jurassiennes doit être remise en question. Nous admettons que passablement de surfaces secondaires sont couvertes d'une végétation indiquant clairement un arrêt de croissance du marais, par une absence totale de sphaignes et plusieurs espèces avec des vitalités réduites. Nous les avons différencié comme "marais secondaire asséché" dans le catalogue typologique des milieux (MULHAUSER *et al.* 1992). Néanmoins, vu les spécificités floristiques des stades décrits, les relations dynamiques mises en évidence par les profils et les projections planes, il est nettement trop restrictif d'assimiler l'ensemble des faciès, groupements, voire associations à la notion de "dégradation". Sans pouvoir strictement démontrer phytosociologiquement l'appartenance de nos groupements à une association ou à une autre, nous considérons que l'approche de BERTRAM (1988) et de DIERSSEN & DIERSSEN (1984) doit être privilégiée pour les stades évolutifs avancés des "milieux secondaires dynamiques" (in MULHAUSER *et al.* 1992), en utilisant à nouveau les sphaignes, indicatrices de l'évolution de ces milieux, dans la nomenclature.

Nous considérons que l'expression de telles différences pour la description de la végétation montre que l'approche phytosociologique syngmatiste n'est pas adaptée à l'échelle de réaction et de régénération du milieu. Pour nous, la typologie des milieux exprime plus fidèlement les micro-évolutions et nous pensons qu'une approche synusiale intégrée (GILLET, 1986) permettrait de respecter nettement mieux l'échelle du fonctionnement interactif des espèces.

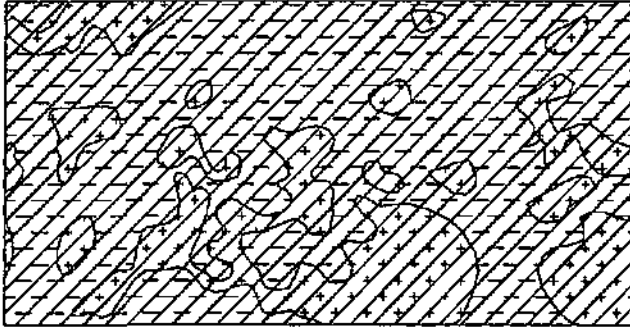
3.4. LA SERIE DES MARAIS TREMBLANTS

3.4.1. La structure verticale de la végétation liée au profil de tourbe

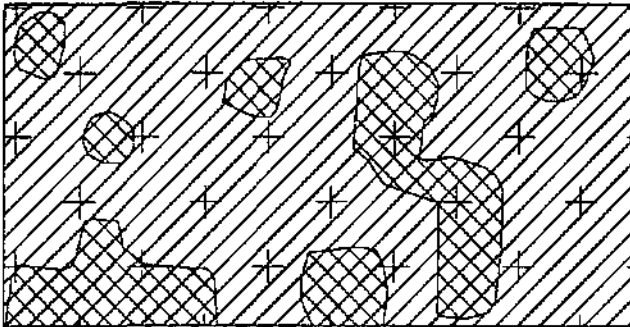
Comme nous l'avons indiqué lors de la présentation des méthodes (c.f. chap. 1), l'analyse de la végétation en relation avec le profil de tourbe ne peut être que partielle pour cette série. Vu le caractère instable des radeaux végétaux décrits à la tourbière de Bellelay, les premiers stades ne permettent pas de creuser de véritables profils pour la description. En fait, seul le premier stade empêche toute interprétation de la structure végétale sur la base du profil. Nous pouvons néan-

Figure 32: Projection plane de la végétation. Série des marais tremblants

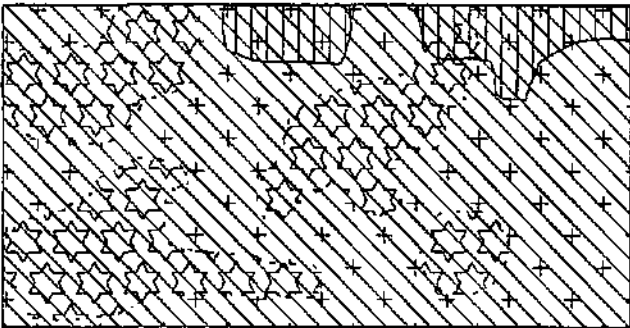
Stade 1



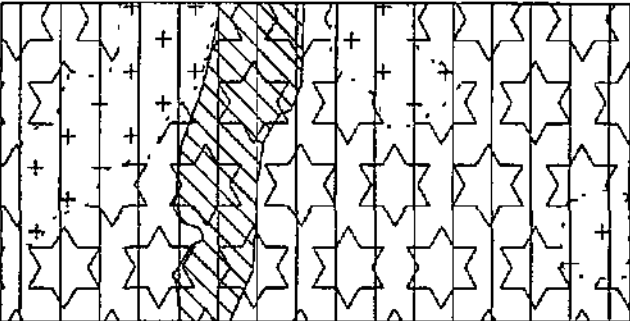
Stade 2









Stade 3



Stade 4



Légende

-  eau libre
-  *Sphagnum angustifolium*
-  *Sphagnum magellanicum*
-  couverture de *Potentilla palustris*
-  couverture de laïches
-  couverture de chaméphytes

Les structures sont superposées.
Les lignes pointillées illustrent
les structures situées en profondeur
et recouvertes.

La densité des trames renseigne sur
l'abondance et le recouvrement rela-
tif des structures et espèces illustrées.
(échelle semi-quantitative)

moins le décrire bien qu'il ne soit pas reporté sur la figure 31. Celle-ci présente la synthèse de la répartition des espèces les plus caractéristiques de nos trois profils "pédologiques". Les figures 44, 45, 46 et 47 présentent les profils pédologiques pour toute la série.

Le premier stade décrit correspond à une phase très pionnière de la colonisation de la creuse, avec des plages d'eau libre en mosaïque avec quelques tapis flottants de *Sphagnum angustifolium* (C. Jens ex Russow) C. Jens. *Potentilla palustris*, *Equisetum fluviatile* et *Calliergon stramineum* sont les espèces dominantes bien que la présence du comaret et de la prêle soit très peu couvrante. Les sphaignes sont posées sur une masse de rhizomes, de racines et de mousses, totalement imbibée d'eau.

Le deuxième stade permet déjà de creuser un petit profil qui révèle une couverture totale du sol par un épais tapis de *Sphagnum angustifolium*, relativement lâche. La limite entre la partie sommitale vivante et la base morte des sphaignes n'est pas nette par la croissance particulière de la masse sphagnale. Celle-ci se couche chaque hiver tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, créant un enchevêtrement de tiges et de feuilles avec les rhizomes et les racines du comaret. *Potentilla palustris* est nettement plus couvrante qu'au premier stade et les premières laïches apparaissent.

Au troisième stade, bien que le radeau soit encore très spongieux et assez tremblant, les premières buttes à sphaignes apparaissent. Une structuration verticale se dessine avec la densification du tapis de sphaignes et la croissance verticale plus rapide de *Sphagnum magellanicum* au niveau de la jeune butte. La présence conjointe de *Sphagnum magellanicum* et de *Sphagnum angustifolium* dans le tapis est déjà ancienne comme l'attestent les "horizons" de surfaces dans lesquels se reconnaissent aisément les restes des deux espèces côte à côte. Ainsi, il semble bien que *Sphagnum magellanicum* s'implante dans le tapis et que c'est la différence de modalité de croissance des deux espèces qui est initiatrice de la butte. Les recherches expérimentales que nous avons menées conjointement en laboratoire (GROSVERNIER, 1996) apportent des informations sur les modalités de croissance entre ces espèces. La figure 46 illustre ce profil. A ce stade, les laïches sont nettement dominantes et couvrent passablement le milieu qui devient fermé avec, posée sur le tapis sphagnal, *Viola palustris* en petit nombre. *Carex lasiocarpa* donne la physionomie verticale au groupement végétal avec, de ci, de là, *Carex rostrata*. Sur les petites buttes, outre *Sphagnum magellanicum*, *Polytrichum strictum* fait son apparition ainsi qu' *Aulacomnium palustre*.

Au quatrième stade, l'alternance "replats et buttes" caractérise parfaitement la structuration verticale du sol. Il n'y a pas présence de gouilles entre les buttes de *Sphagnum magellanicum* qui sont systématiquement reliées par un tapis assez dense de *Sphagnum angustifolium*. L'épaisseur de la partie vivante du tapis de sphaignes est assez importante avec 10 à 12 cm pour les buttes et 5 à 8 cm au niveau des replats. Les chaméphytes sont présents partout (*Vaccinium oxycoccos*) ou réguliers (*Andromeda polifolia*). Les laïches sont très peu présentes (*Carex nigra* et *Carex rostrata*), ce qui diminue fortement le développement vertical de la végétation et son recouvrement sur le sol. Comme pour le troisième stade, *Polytrichum strictum* et *Aulacomnium palustre* sont présents parmi les tiges de sphaignes mais uniquement sur les buttes.

Tableau 7: Résultats de l'analyse des transects. "Tests" sur les débuts et les fins et sur le mode de groupement des espèces. Transect 1 - 2, série des marais tremblants, Bellelay

Transect de végétation des stades 1 et 2, résultats sur la position des espèces

	F	S	Deb(S) binon	T	Fin(T) binon	F	D	G	<G>	Grp(G)	Mode
Rhytidiadelphus sp1	1	2	5.91	2	5.91	1	1	1			
Carex echinata	1	5	5.91	5	5.91	1	1	1			
Sorbus aucuparia (juv.)	2	1	4.91	6	8.47	2	6	2	2.00	0.00	aléatoire
Polytrichum alpestre	7	1	3.10	18	14.93	7	18	2	5.13	9.51	contagieux
Pleurozium schreberi	20	1	1.58	20	51.90	20	20	1			
Hylocomnium splendens	13	1	2.21	20	26.61	13	20	3	5.67	6.33	contagieux
Dicranum scoparium	11	2	2.72	16	26.77	11	15	3	4.08	2.40	contagieux
Pinus sylvestris	2	3	4.96	14	7.09	2	12	2	2.00	0.00	aléatoire
Vaccinium vitis-idaea	34	6	7.07	39	37.02	34	34	1			
litière de bouleau	28	2	1.98	32	41.58	28	31	2	3.79	7.08	contagieux
Calluna vulgaris	24	1	1.32	41	18.63	24	21	6	11.03	9.70	contagieux
Betula pubescens (arb.)	9	1	2.74	33	10.46	9	33	6	7.19	2.41	contagieux
Vaccinium uliginosum	33	4	4.34	42	27.90	33	39	4	6.19	5.55	contagieux
Picea abies (arb.)	14	7	4.37	34	14.89	14	28	4	8.00	8.76	contagieux
Vaccinium myrtillus	6	9	4.41	14	15.25	6	6	1			
Eriophorum vaginatum	17	1	1.82	51	6.30	17	51	10	12.10	3.31	contagieux
Dicranum sp2	1	14	5.91	14	5.91	1	1	1			
Fagus sylvatica	1	15	5.91	15	5.91	1	1	1			
Polytrichum commune	11	20	8.66	30	14.06	11	11	1			
Picea abies (semis)	1	27	5.91	27	5.91	1	1	1			
Sphagnum flexuosum	2	33	6.03	34	5.75	2	2	1			
Sphagnum magellanicum	20	1	1.58	46	10.75	20	46	3	12.23	27.84	contagieux
Sphagnum angustifolium	30	31	56.71	60	1.00	30	30	1			
Carex lasiocarpa	20	35	34.46	60	1.58	20	26	2	5.75	12.79	contagieux
Potentilla palustris	19	42	50.86	60	1.66	19	19	1			
Eriophorum angustifolium	11	42	22.90	56	3.55	11	15	3	4.08	2.40	contagieux
Equisetum fluviatile	11	42	22.90	56	3.55	11	15	3	4.08	2.40	contagieux
Betula pubescens (juv.)	4	43	9.49	46	5.10	4	4	1			
Vaccinium oxycoccos	4	43	9.49	47	5.01	4	5	2	2.00	0.00	aléatoire
eau libre	8	49	22.89	58	3.27	8	10	2	2.75	2.00	contagieux
Calliergon stramineum	7	50	20.81	56	3.74	7	7	1			
Carex rostrata	6	37	10.54	57	3.71	6	21	3	5.75	12.79	contagieux
Carex canescens	1	58	5.91	58	5.91	1	1	1			

- F: Fréquence de l'espèce sur le transect
S: Position de la première occurrence de l'espèce
Deb(S): Quantité d'information fournie par la position de (S), en binon
T: Position de la dernière occurrence de l'espèce
Fin (T): Quantité d'information fournie par la position de (T), en binon
D: Nombre de segments compris entre S et T (étendue sur le transect)
G: Nombre de groupes formés par l'espèce en D
<G>: Espérance de G (valeur la plus probable considérant F et D)
Grp(G): Quantité d'information apportée par la mesure de G
mode: Type de répartition des groupes sur D, le choix dépend des relations entre <G> et G.

3.4.2. La structure horizontale de la végétation

Les projections planes illustrées sur la figure 32 permettent de visualiser la modification totale de la structure végétale entre les 4 stades décrits. Nous avons choisi de présenter les espèces les plus démonstratives, de la colonisation des petits plans d'eau à l'édification des buttes à sphaignes.

La structure horizontale confirme la totalité des renseignements obtenus sur la base des transects.

Au niveau des deux premiers stades, il est très intéressant de noter l'étroite relation entre les plages de sphaignes et la densité de *Potentilla palustris*. En phase initiale, le comaret n'est pas uniformément réparti sur la surface. Il se groupe en plages lâches en laissant des secteurs libres. Ces derniers sont délaissés par les sphaignes ce qui permet l'existence des plans d'eau. La fig. 32 ne le montre pas pour des raisons de lisibilité des hachures. Le deuxième stade présente une répartition régulière du comaret sur toute la surface et une couverture totale du sol par les sphaignes.

L'examen attentif du troisième stade permet de confirmer l'implantation conjointe de *Sphagnum magellanicum* et de *Sphagnum angustifolium*. Les secteurs désignés comme "butte" présentent les deux espèces avec, pour les buttes déjà assez grandes, une inversion de leur densité relative du bord vers le centre. Nous avons mesuré que pour les jeunes buttes couvrant au moins 1/3 de m², *Sphagnum magellanicum* prend nettement l'ascendant vers le centre. Pour les buttes plus petites, à l'élévation moins marquée, *Sphagnum angustifolium* est nettement dominante avec présence irrégulière de *Sphagnum magellanicum*. *Polytrichum strictum* est noté un peu partout et ne semble pas influencer le dynamisme initiateur de la butte.

3.4.3. Les transects de végétation

Afin de caractériser avec plus de précision la répartition spatiale de la végétation dans les creuses et en bordure de celles-ci, nous avons décrit et analysé trois longs transects perpendiculaires aux fosses. Pour ces descriptions, la notion d' "espèce" a été élargie aux différents stades de croissance des arbres (séparation des arbres adultes et des jeunes individus); la litière de bouleau, particulièrement couvrante et influante pour le dynamisme des espèces herbacées et muscinales, a également été considérée comme une espèce, tout comme l'eau libre, illustrant le premier stade et les secteurs libres de végétation, ou à végétation totalement immergée.

Le premier transect couvre les deux premiers stades, ceux-ci étant en étroites relations spatiales. Outre l'aspect descriptif des groupements végétaux, ces transects sont à mettre en relation avec l'analyse des macrofossiles liés à l'histoire récente de la recolonisation végétale de ces fosses et aux caractéristiques du gradient micrométéorologique. Les figures 33, 34 et 35 illustrent les trois transects de végétation. Les transects ont été analysés au moyen du programme ANATRANS du Laboratoire d'Ecologie végétale de l'Université de Neuchâtel, selon la méthodologie décrite au chapitre 2. Les résultats chiffrés de ces analyses sont présentés aux tableaux 7, 8 et 9. Ces tableaux renseignent sur la quantité d'information fournie par chaque espèce en fonction de la position de leur première et de leur dernière apparition sur le transect ainsi que sur le mode de distribution des espèces (modes de regroupement). La figure 35bis présente un essai de synthèse de l'évolution de la végétation à travers les fosses et en relation avec la végétation forestière.

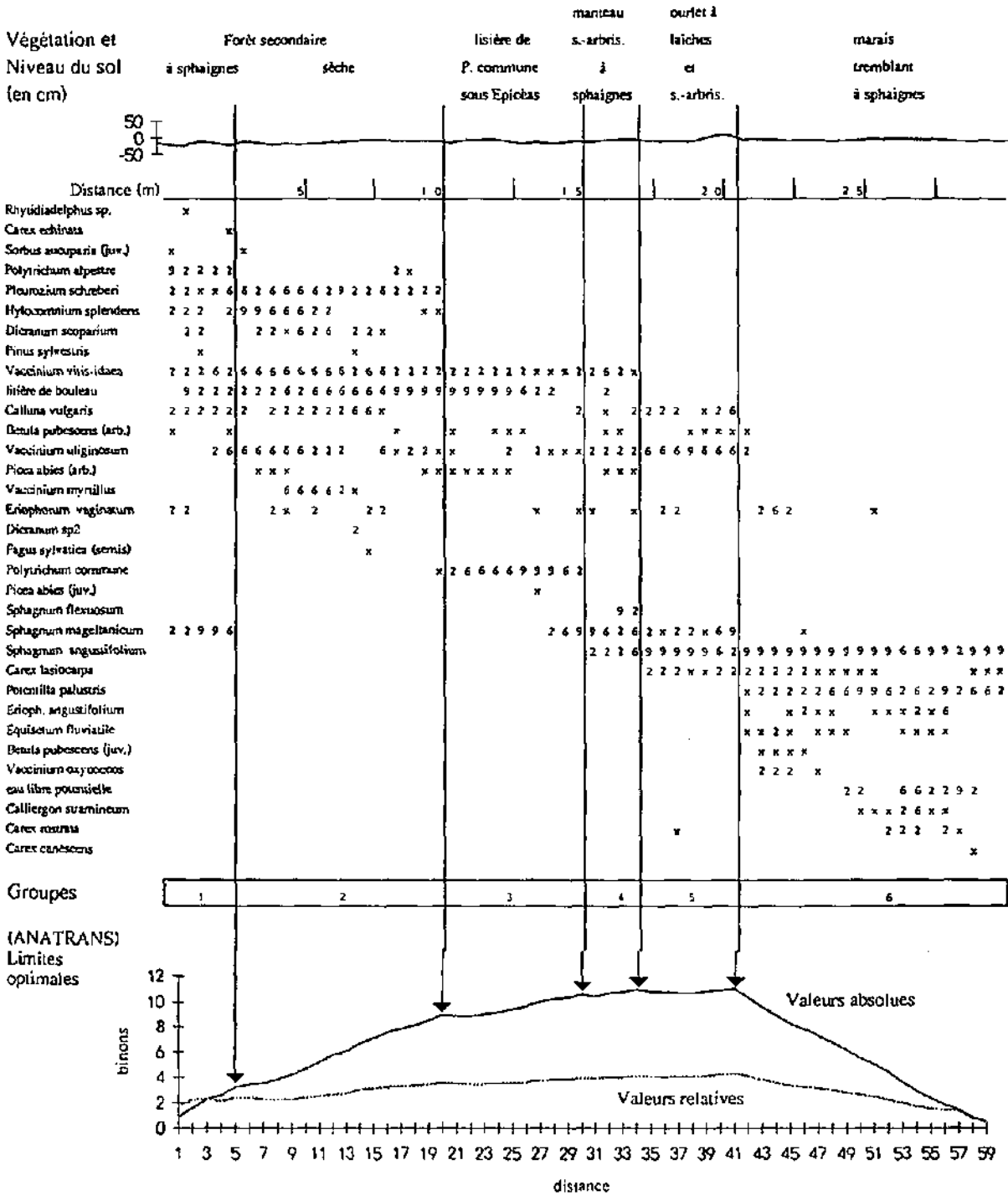
3.4.3.1. Les stades 1 et 2

L'organisation des espèces le long du transect est illustrée à la figure 33. Avec une longueur de 30,5 mètres, le premier transect traverse les milieux forestiers secondaires bordant les fosses, le

Figure 33

Transect de végétation - Série des marais tremblants
Stades I et 2

Tourbière de Bellelay longueur du transect: 30,5 m



manteau de sous-arbrisseaux chaméphytiques, les touradons d'*Eriophorum vaginatum* pour se terminer au niveau du radeau "tremblant" lui-même.

Le tableau 7 nous permet de constater que 8 espèces fournissent une grande quantité d'information sur le transect par la position de leur première occurrence (valeur > 10 binons). Ces espèces correspondent au groupement caractéristique des marais de transition (*Caricion lasiocarpae*) et séparent nettement deux sous-transects, et ce, avec la meilleure limite optimale (c.f. fig. 33). A l'inverse, 12 espèces présentent une dernière occurrence sur le transect qui fournit une quantité d'information importante (valeur > 10 binons). Vu le gradient décrit, il n'est pas surprenant que ces espèces soient les deux arbres du transect (*Betula pubescens* et *Picea abies*), les espèces de *Vaccinium* se développant en sous-arbrisseaux, ou les mousses de sous-bois. *Sphagnum magellanicum* fait partie de ces 12 espèces. Au niveau de l'organisation des groupes, 14 espèces sur 32 sont totalement assemblées en un bloc continu, avec, parmi elles, 5 espèces présentes une seule fois. A l'inverse, *Vaccinium vitis-idaea* forme également un seul groupe, mais avec le plus grand nombre d'occurrence de toutes les espèces. 3 espèces s'organisent en groupes répartis en mode aléatoire alors que les 15 dernières présentent un mode d'organisation des groupes dit "contagieux", attestant la formation de peu de groupes relativement importants.

La quantification des limites optimales permet la différenciation de 6 sous-transects, équivalents à la mise en évidence de 6 groupements végétaux. La figure 33 permet de voir que la coupure la plus nette sépare le marais tremblant des milieux stables voisins. Le marais tremblant (groupe 6) débute avec la première occurrence d'*Eriophorum angustifolium*, de *Potentilla palustris* et d'*Equisetum fluviatile* et la dernière occurrence de *Vaccinium uliginosum* et de *Sphagnum magellanicum*. Par contre, le stade pionnier avec l'eau libre n'apparaît pas comme un groupement séparé à l'extrémité droite du transect par le fait que la transition des espèces se fait graduellement sur 2 à 3 relevés, au début comme à la fin des limites potentielles. Vu son faible développement spatial et un effet de bord lié à la méthode, on ne peut pas différencier un septième groupe d'espèce.

Les 5 premiers groupes illustrent le gradient hydrique et lumineux des forêts secondaires, développées sur les mamelons de tourbe maintenus partiellement en place lors des exploitations, au bord de la fosse. Ainsi, dans le détail, entre le groupe 1 et le groupe 2, la disparition de *Polytrichum strictum*, de *Sphagnum magellanicum* et l'apparition de *Vaccinium uliginosum* et de *Vaccinium myrtillus* indiquent un assombrissement du sol provoqué par la présence de quelques grands Epicéas au début du groupe 2. Si la transition entre ces deux groupes n'est pas très nette, elle est passablement plus franche avec le groupe 3, caractérisé par une forte densité d'Epicéas, la disparition de *Vaccinium myrtillus*, *Calluna vulgaris*, *Pleurozium schreberi*, d'*Hylocomnium splendens*, de *Dicranum scoparium*, remplacés par un épais et dense tapis de *Polytrichum commune*. Le groupe 4 présente encore des arbres mais le sol se couvre déjà de Sphaignes hygrophiles (*Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum flexuosum*) accompagnées de *Sphagnum magellanicum*. La litière de bouleau ne couvre plus le sol contrairement aux trois premiers groupes. Le groupe 5 se distingue par l'absence de *Vaccinium vitis-idaea*, de *Picea abies* et l'apparition de *Carex lasiocarpa*. *Calluna vulgaris*, *Vaccinium uliginosum*, *Sphagnum magellanicum* présentent une vitalité optimale.

Sans caractériser un groupe en particulier, *Eriophorum vaginatum* se répartit sur les 5 premiers groupes, plutôt dans les secteurs ouverts.

Tableau 8: Résultats de l'analyse des transects. "Tests" sur les débuts et les fins et sur le mode de groupement des espèces. Transect 3, série des marais tremblants, Bellelay

Transect de végétation du stade 3, résultat sur la position des espèces

	F	S	Deb(S) binon	T	Fin(T) binon	F	D	G	<G>	Grp(G)	mode
<i>Pinus silvestris</i>	1	1	4.95	1	4.95	1	1	1			
<i>Pleurozium schreberi</i>	2	1	3.95	2	8.86	8	8	1			
<i>Hylocomnium splendens</i>	3	1	3.37	3	12.13	3	3	1			
<i>Picea abies</i> (arb.)	4	1	2.95	4	14.94	4	4	1			
<i>Eriophorum vaginatum</i>	4	1	2.95	5	12.94	4	5	2	2.00	0.00	aléatoire
litière de bouleau	8	1	1.95	8	22.91	8	8	1			
<i>Vaccinium myrtillus</i>	8	1	1.95	8	22.91	8	8	1			
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	9	1	1.78	9	24.26	9	9	1			
<i>Calluna vulgaris</i>	6	1	2.37	8	15.10	6	8	2	2.67	1.58	contagieux
<i>Sphagnum girgensohnii</i>	5	3	3.05	7	13.47	5	5	1			
<i>Betula pubescens</i> (arb.)	2	5	4.16	6	6.54	2	2	1			
<i>Sphagnum flexuosum</i>	5	8	4.26	12	9.01	5	5	1			
<i>Betula pubescens</i> (juv.)	10	1	1.63	24	5.76	10	24	4	6.73	5.61	contagieux
<i>Sphagnum magellanicum</i>	13	1	1.25	31	1.25	13	31	2	8.45	21.46	contagieux
<i>Vaccinium uliginosum</i>	14	1	1.15	17	18.95	14	17	4	3.60	0.67	aléatoire
<i>Carex lasiocarpa</i>	26	6	17.37	31	0.25	26	26	1			
<i>Betula pubescens</i> (sem.)	3	12	4.72	30	3.47	3	19	2	2.88	3.09	contagieux
<i>Sphagnum angustifolium</i>	16	13	18.49	31	0.95	16	19	3	3.65	1.70	contagieux
<i>Vaccinium oxycoccos</i>	11	17	16.37	31	1.49	11	15	4	4.08	0.99	aléatoire
<i>Aulacomnium palustre</i>	12	16	16.66	29	2.72	12	14	3	2.83	0.26	aléatoire
<i>Equisetum fluviatile</i>	8	14	8.66	31	1.95	8	18	4	5.37	2.67	contagieux
<i>Carex rostrata</i>	4	14	5.53	17	5.81	4	4	1			
<i>Epilobium palustre</i>	6	15	7.40	20	5.98	6	6	1			
<i>Viola palustris</i>	2	16	4.95	19	4.69	2	4	2	2.00	0.00	aléatoire
<i>Rhitiadelphus</i> sp.	1	17	4.95	17	4.95	1	1	1			
litière de <i>Cx. lasiocarpa</i>	5	17	7.41	24	4.26	5	8	3	3.00	0.74	aléatoire
<i>Pleurozium schreberi</i>	8	21	16.00	28	3.15	8	8	1			
<i>Eriophorum angustifolium</i>	6	22	12.51	28	3.19	6	7	2	2.00	0.00	aléatoire
<i>Carex canescens</i>	5	23	11.25	27	3.51	5	5	1			
cau libre	2	27	6.86	28	4.11	2	2	1			
<i>Polytrichum alpestre</i>	1	29	4.95	29	4.95	1	1	1			
<i>Polytrichum commune</i>	1	30	4.95	30	4.95	1	1	1			

- F: Fréquence de l'espèce sur le transect
- S: Position de la première occurrence de l'espèce
- Deb(S): Quantité d'information fournie par la position de (S), en binon
- T: Position de la dernière occurrence de l'espèce
- Fin (T): Quantité d'information fournie par la position de (T), en binon
- D: Nombre de segments compris entre S et T (étendue sur le transect)
- G: Nombre de groupes formés par l'espèce en D
- <G>: Espérance de G (valeur la plus probable considérant F et D)
- Grp(G): Quantité d'information apportée par la mesure de G
- mode: Type de répartition des groupes sur D, le choix dépend des relations entre <G> et G

3.4.3.2. Le stade 3

Le transect est illustré à la figure 34, avec les espèces recensées. Sa longueur est la plus faible avec 15,5 mètres. Il traverse les mêmes milieux que le premier transect mais offre un peu moins de détails dans les milieux forestiers, plus lâches et plus ouverts dans cette zone. Au niveau de la creuse, on retrouve le marais tremblant, avec cette fois, l'apparition d'une butte à sphaignes, caractéristique de l'évolution mise en évidence par ce stade pour la série décrite.

Le tableau 8 nous permet de constater que la structure décrite pour le transect précédent est parfaitement retrouvée avec 7 espèces fournissant une quantité d'information par leur première occurrence supérieure à 10 binons (les espèces des marais tremblants) et 9 espèces forestières donnant une quantité d'information équivalente quant à leur dernière occurrence. Comme précédemment, ces deux groupes séparent le transect en deux sous-transects avec la meilleure limite (fig. 34). L'organisation des groupes suit la même logique avec 19 espèces sur 32 qui sont assemblées en blocs uniques (4 espèces présentes une seule fois). *Carex lasiocarpa* caractérise nettement ce stade avec un seul groupe et le nombre d'occurrence maximal. 7 espèces s'assemblent en groupes répartis de manière aléatoire alors que 6 espèces se groupent selon le mode "contagieux". Comme pour le premier transect, ces résultats indiquent une position préférentielle de chaque espèce en fonction des conditions écologiques (préférendum) et une petite dispersion de part et d'autre du centre de gravité.

Contrairement au premier transect, la recherche sur les limites optimales ne permet pas de former des groupes d'espèces aussi nets. La figure 34 permet de constater, qu'à part la limite claire déjà discutée en relation avec l'analyse des groupes, il est difficile de mettre en évidence d'autres coupures bien tranchées.

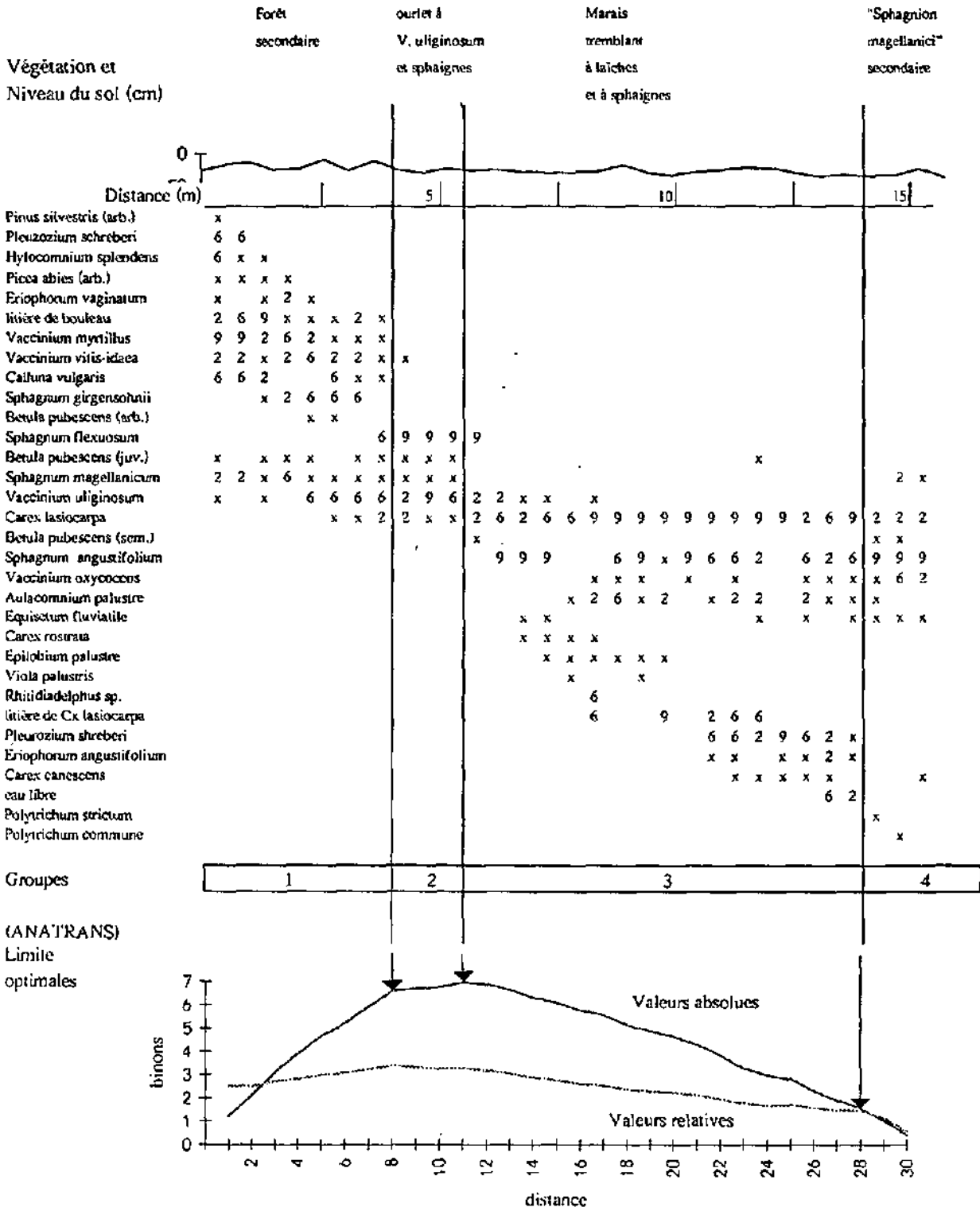
Ce fait indique des conditions écologiques déjà moins tranchées, à mettre en relation avec l'évolution dynamique de la série et la position intermédiaire de ce stade dans la succession. Ici en effet, la régénération est déjà nettement plus avancée qu'au niveau du premier transect. La végétation hygrophile et les sphaignes caractéristiques de la creuse ont atteint un degré de développement vertical leur permettant une colonisation latérale plus marquée, en direction des sous-bois. Leur présence stable hors de la fosse permet une modification plus prononcée des conditions fonctionnelles du milieu et une uniformisation végétale.

Quatre groupes sont identifiables, dont deux pour les milieux forestiers et pré-forestiers. La limite mise en évidence dans la surface forestière (groupe 1 et 2) est la plus marquée des coupures secondaires. Ceci provient du fait qu'elle est caractérisée par la disparition de *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, de *Calluna vulgaris* et de *Sphagnum girgensohnii* Russow. La litière de bouleau marque ici également sa limite. Le groupe 2 bien que présentant une forte couverture de jeunes bouleaux correspond à l'ourlet de *Vaccinium uliginosum*, *Sphagnum magellanicum* et *Carex lasiocarpa* décrit au transect précédant (groupe 5 du transect 1-2). Contrairement au premier cas, le long du transect 3, *Sphagnum flexuosum* et *Carex lasiocarpa* pénètrent au niveau du massif forestier, dans la litière de bouleau et parmi *Vaccinium myrtillus* qui présente déjà une densité plus faible. Il y a donc incontestablement avancé des plantes caractéristiques du marais inondé, de la creuse vers la forêt secondaire. Cette constatation peut paraître surprenante si l'on se réfère au schéma classique de l'atterrissement d'un plan d'eau, des stades pionniers à la forêt. Ici, la forêt représente également le stade ultime de l'évolution mais pas sous la forme décrite en bordure des fosses. Le dynamisme vertical du tapis de sphaignes permet une élévation du plan d'eau. Comme

Figure 34

Transect de végétation - Série des marais tremblants
Stade 3

Tourbière de Bellelay longueur du transect: 15.5 m



nous le montrons, à partir d'un certain niveau, les conditions écologiques générales sont telles que la croissance verticale s'accompagne d'une colonisation latérale. Les caractéristiques des forêts secondaires se modifient donc prioritairement par la végétation du sous-bois qui répond à l'avance du tapis de sphaignes (paludification, GORE, 1983). Comme la croissance verticale au centre de la fosse est limitée physiquement, l'assèchement et la stabilisation de ce milieu permettront une implantation des arbres. Il y aura alors convergence structurelle entre les milieux et uniformisation physiognomique à travers tout le marais abaissé.

Au niveau de la creuse elle-même, malgré quelques irrégularités dans la répartition des espèces, il n'est pas possible de constituer plus de deux groupes, déjà difficile à caractériser avec netteté. Le groupe 4 se différencie du groupe principal illustrant le marais tremblant par l'apparition de semis de bouleau, l'implantation nouvelle de *Sphagnum magellanicum*, accompagné de *Polytrichum strictum* et *Polytrichum commune*. *Vaccinium oxycoccos*, bien que déjà présent dans le groupe précédent, présente ici sa meilleure densité et vitalité. Ce groupe illustre le changement de flore induit par la constitution des buttes à sphaignes dans les marais tremblants.

3.4.3.3. Le stade 4

Cette troisième description végétale présente une structure comparable à celle décrite pour les deux premiers transects. L'organisation de la végétation sur les 27 mètres illustrant la transition entre la forêt et la creuse évoluée est présentée à la figure 35.

Le tableau 9 rassemble les résultats de l'analyse effectuée avec ANATRANS pour les "tests" sur les "début et les fins" des espèces et sur les groupes. Parmi les 25 espèces recensées, 8 ont une première occurrence dont la position fournit une quantité d'information supérieure à 10 binons et 6 une équivalence d'information quant à leur dernière occurrence. La signification de ces deux groupes d'espèces n'est pas aussi nette que pour les deux premiers transects. Si les informations sur la position finale de l'espèce le long du transect correspondent aux espèces forestières comme pour les deux premiers transects, les espèces dont la première occurrence est significative rassemblent principalement les caractéristiques des hauts-marais (classe des *Oxycocco-Sphagnetea*) avec *Sphagnum fallax* et *Sphagnum angustifolium* qui marquent encore la position de la creuse. Comme le montre l'analyse sur les groupes de positions, les espèces sont plus dispersées le long du transect, avec 8 espèces qui présentent un seul groupe de position. 4 espèces ont une position des groupes aléatoire et 12 espèces ont des groupes répartis en mode "contagieux". *Picea abies*, dans sa forme jeune, présente une répartition régulière sur la portion de transect qu'il occupe. *Vaccinium oxycoccos* est l'espèce la plus fréquente du transect.

La quantification des limites optimales (c.f. fig. 35) permet la constitution de 6 groupements végétaux principaux. Deux groupes pourraient être subdivisés, mais avec des limites floues.

Confirmant la régénération du marais en direction des forêts secondaires, la limite entre ces dernières et le marais ouvert correspondant à l'ancienne creuse n'est pas nette, comme pour le troisième stade décrit. Ainsi, les arbres adultes et les jeunes ont un spectre de répartition assez large et ne permettent plus de mettre en évidence les changements de conditions écologiques. C'est le sous-bois qui répond à ces conditions et informe sur les modifications qui interviennent dans ces forêts secondaires.

Tableau 9: Résultats de l'analyse des transects. "Tests" sur les débuts et les fins et sur le mode de groupement des espèces. Transect 4, série des marais tremblants, Bellelay

Transect de végétation du stade 4, résultat sur la position des espèces

	F	S	Deb(S) binon	T	Fin(T) binon	F	D	G	<G>	Grp(G)	mode
litière de bouleau	9	1	2.58	31	9.83	9	31	4	7.07	7.05	contagieux
litière d'épicéa	7	1	2.95	18	13.80	7	18	3	5.13	4.86	contagieux
<i>Picea abies</i> (arb.)	8	1	2.75	24	12.05	8	24	3	6.09	7.89	contagieux
<i>Betula pubescens</i> (arb.)	4	1	3.75	20	8.35	4	20	2	3.67	5.67	contagieux
<i>Picea abies</i> (juv.)	9	1	2.58	18	17.74	9	18	6	5.50	1.55	régulier
<i>Pleurozium schreberi</i>	3	1	4.07	40	5.06	3	40	2	2.95	4.25	contagieux
<i>Vaccinium myrtillus</i>	11	1	2.30	11	36.48	11	11	1			
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	27	1	1.00	27	50.79	27	27	1			
<i>Sphagnum girgensohnii</i>	24	2	1.99	27	38.97	24	26	2	2.92	3.58	contagieux
<i>Polytrichum strictum</i>	8	14	5.80	54	2.75	8	41	3	6.92	12.25	contagieux
<i>Sphagnum magellanicum</i>	36	1	0.58	54	0.58	36	54	4	13.12	25.51	contagieux
<i>Vaccinium uliginosum</i>	30	6	6.93	54	0.85	30	49	5	12.72	18.46	contagieux
<i>Betula pubescens</i> (juv.)	9	17	7.11	34	8.58	9	18	5	5.50	1.55	aléatoire
<i>Calluna vulgaris</i>	22	13	11.50	54	1.30	22	42	7	11.50	7.77	contagieux
<i>Vaccinium oxycoccos</i>	43	9	22.69	54	0.33	43	46	4	3.86	0.21	aléatoire
<i>Eriophorum vaginatum</i>	27	12	13.51	53	1.97	27	42	8	10.75	4.35	contagieux
<i>Sphagnum flexuosum</i>	7	28	9.59	34	7.32	7	7	1			
<i>Polytrichum commune</i>	17	30	25.93	46	6.19	17	17	1			
<i>Sphagnum fallax</i>	8	35	14.33	43	5.27	8	9	2	2.00	0.00	aléatoire
<i>Eriophorum angustifolium</i>	3	43	8.82	52	4.28	3	10	2	2.75	2.00	contagieux
<i>Andromeda polifolia</i>	4	44	11.36	47	4.38	4	4	1			
<i>Sphagnum angustifolium</i>	11	44	36.48	54	2.30	11	11	1			
<i>Carex rostrata</i>	3	44	9.11	51	4.34	3	8	3	2.67	0.58	aléatoire
<i>Carex canescens</i>	5	45	14.62	49	4.02	5	5	1			

- F: Fréquence de l'espèce sur le transect
S: Position de la première occurrence de l'espèce
Deb(S): Quantité d'information fournie par la position de (S), en binon
T: Position de la dernière occurrence de l'espèce
Fin (T): Quantité d'information fournie par la position de (T), en binon
D: Nombre de segments compris entre S et T (étendue sur le transect)
G: Nombre de groupes formés par l'espèce en D
<G>: Espérance de G (valeur la plus probable considérant F et D)
Grp(G): Quantité d'information apportée par la mesure de G
mode: Type de répartition des groupes sur D, le choix dépend des relations entre <G> et G

Le groupe 1 illustre parfaitement les phases initiales de recolonisation forestière à partir des mame-lons tourbeux originaux, asséchés par les fosses profondes. Une litière importante couvre le sol, colonisé par une végétation très pauvre avec *Vaccinium myrtillus* et *V. vitis-idaea* sous les épicéas et les bouleaux. Outre *Pleurozium schreberi*, les mousses forestières sont absentes de cette zone. La présence de *Sphagnum magellanicum* est un peu erronée considérant sa localisation limitée aux souches.

Le groupe 2 illustre le changement possible pour les secteurs ouverts des forêts. Les arbres adultes sont espacés et n'apparaissent pas sur le transect, le long duquel seuls les jeunes épicéas sont notés. *Vaccinium myrtillus* est encore bien présent mais trouve dans ce groupe sa limite d'extension. *Vaccinium vitis-idaea* continue de marquer le sous-bois de sa présence et *Vaccinium oxycoccos* fait son apparition. Changement fondamental par rapport au secteur asséché voisin, la présence d'un tapis continu de *Sphagnum girgensohnii*. Comme le montre la figure 35, la présence de litière se résume à de très petites densités, sur une étendue limitée de cette portion du transect.

Le groupe 3 illustre le manteau pré-forestier faisant la transition avec la forêt. L'ouverture du milieu est encore plus importante qu'au groupe 2 ce qui permet l'apparition de *Vaccinium uliginosum* et *Calluna vulgaris* qui remplacent totalement *Vaccinium myrtillus*. *Eriophorum vaginatum* fait également son apparition ce qui dénote la constance de l'humidité du sol. Les sphaignes ont une présence et un recouvrement identique qu'au groupe 2. La présence de *Vaccinium vitis-idaea* et de *Sphagnum girgensohnii* atteste encore le caractère forestier de ce groupe. Selon la répartition relative de ces espèces, il est possible de constituer 3 sous-groupes en relation avec la discontinuité de la courbe calculée pour la recherche des limites optimales (cf. figure 35).

Le groupe 4 caractérise une phase humide du manteau avec l'optimum de *Vaccinium uliginosum*, la disparition totale de *Vaccinium vitis-idaea* et de *Sphagnum girgensohnii* et l'apparition de *Sphagnum flexuosum* et de *Polytrichum commune*. Quelques jeunes bouleaux marquent encore le caractère forestier du groupement.

Avec le groupe 5, le milieu est totalement ouvert et marque la dominance d'*Eriophorum vaginatum* et la disparition de *Vaccinium uliginosum* et de *Calluna vulgaris*. *Sphagnum fallax* remplace *Sphagnum flexuosum* et est accompagné d'un dense tapis de *Polytrichum commune*, dont la présence marque nettement la physionomie du groupement.

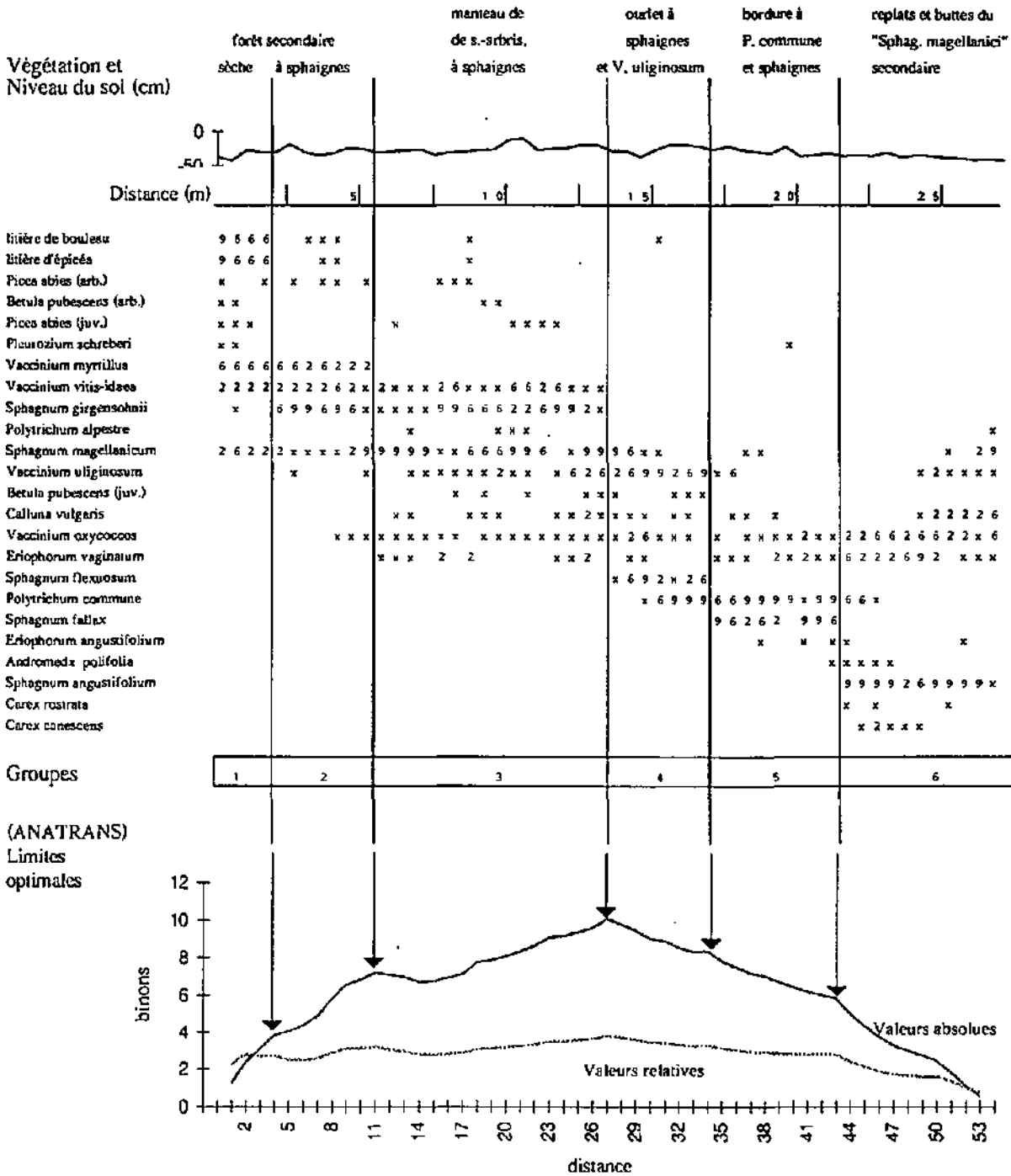
Le dernier groupe correspond à la position centrale de l'ancienne fosse, dont l'évolution des groupements permet la différenciation d'un *Sphagnum magellanicum* secondaire. Le groupe est caractérisé par la présence de *Sphagnum angustifolium*, l'absence de *Polytrichum commune* et la disparition de *Sphagnum fallax*. *Eriophorum vaginatum* et *Vaccinium oxycoccos* y ont leurs optimums de développement. Un gradient interne au groupe se marque vers la bordure du transect et correspond au changement "replat-butte", avec la diminution d'*Eriophorum vaginatum*, le retour de *Vaccinium uliginosum*, de *Calluna vulgaris*, de *Sphagnum magellanicum* et de *Polytrichum strictum*. *Carex rostrata*, *Carex canescens* et dans une moindre mesure *Eriophorum angustifolium* marquent le replat humide avec les seules localisations d'*Andromeda polifolia*.

Figure 35

**Transect de végétation - Série des marais tremblants
Stade 4**

Tourbière de Bellelay

longueur du transect: 27 m



3.4.4. Caractéristiques végétales de la série

La série des "treublants" illustre parfaitement les résultats typologiques avec les groupements lâches et instables des premiers stades et l'individualisation du *Sphagnion magellanici* avec la présence de buttes et de chaméphytes pour les stades finaux. Cette série est sous l'influence directe et constante de l'eau (quantité et qualité) mais également des caractéristiques physiques des fosses (forme, grandeur) et de la nature de la tourbe laissée ou remise au fond des creuses pendant l'exploitation. L'analyse des macrorestes végétaux permettra peut-être d'expliquer les différences de dynamisme en relation avec la forme des fosses (verticalité des fronts de tailles, profondeur et position des différents planchers créés par les travaux humains et décrits par PARIAT (1988)). La provenance et la qualité chimique des eaux s'accumulant dans les fosses ont également une importance primordiale. Dans ce sens, les analyses physico-chimiques des eaux de la nappes et des sphaignes apporteront peut-être une explication complémentaire.

La végétation des marais de transition et les marais treublants recolonisant des fosses de tourbage ont été décrits par de nombreux auteurs parmi lesquels nous citerons pour le Jura, GUINOCHET (1955), MATTHEY W. (1964), ROYER *et al.* (1978 et 1979), GALLANDAT (1982), BUTTLER & CORNALI (1983), GILLET & GUENAT (1983), JULVE (1983) DIERSSEN & DIERSSEN (1984), FELDMeyer-CHRISTE (1987 et 1990).

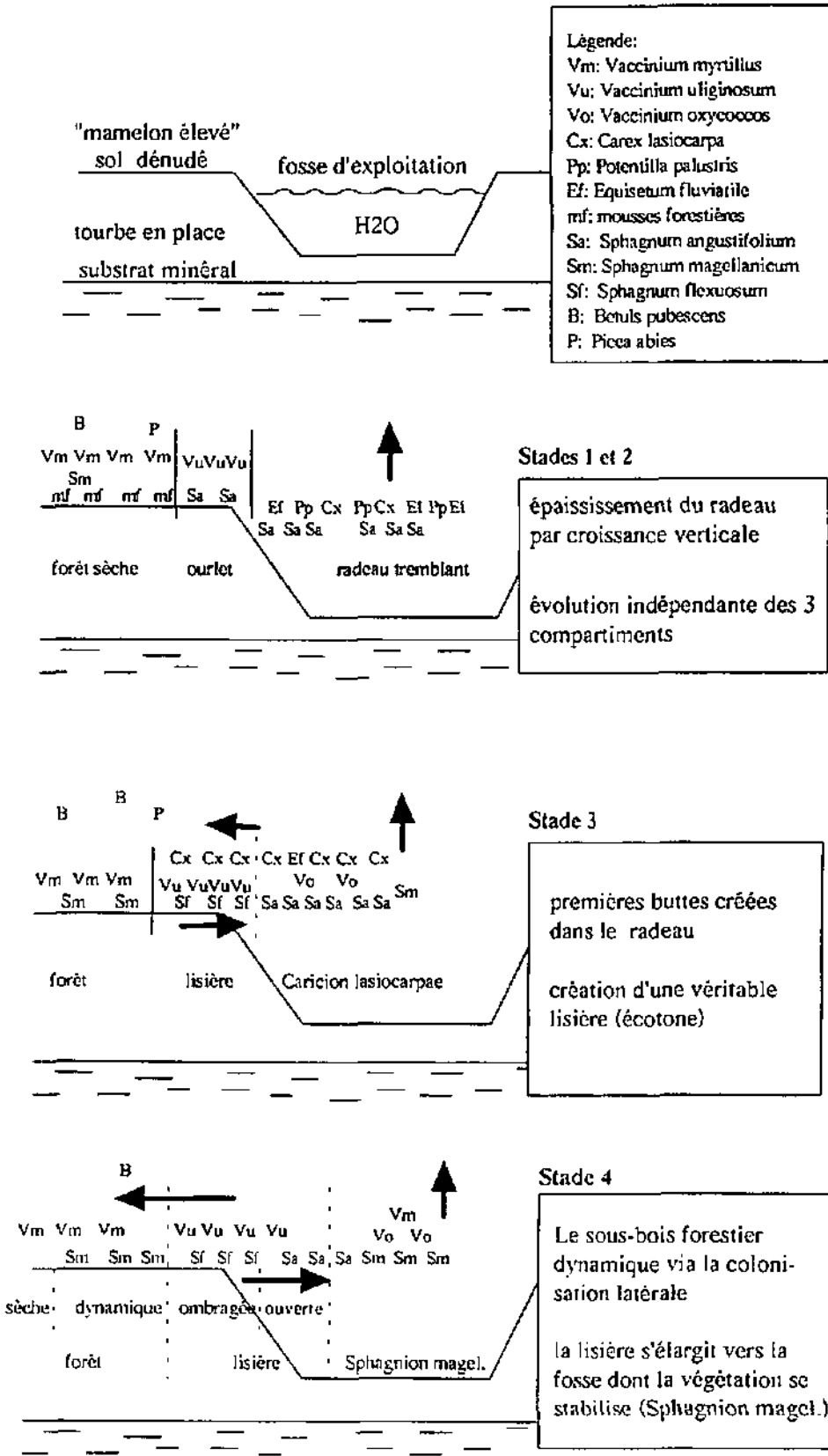
Nos trois premiers stades s'apparentent parfaitement à l'association signalée par ROYER *et al.* (1978 et 1979), et GALLANDAT (1982) sous le nom de *Sphagno-Caricetum lasiocarpae* (Steffen 31 em. Pass. 64). FELDMeyer-CHRISTE (1990) décrit deux sous-associations pour le *Caricetum lasiocarpae* selon l'acidité du milieu. Elle rattache la végétation des grandes fosses de Bellelay au *Caricetum lasiocarpae sphagnetosum angustifolii* (Feld.-Christe 90). Notre quatrième stade s'apparente au *Sphagnion magellanici* (Kästn. und Flöss. 33) pour l'extrémité du transect situé sur l'ancienne creuse. Cette zone illustre un milieu en plein dynamisme et s'apparente tout à fait à la mosaïque des différentes sous-associations du *Sphagnetum magellanici* décrites par MATTHEY W. (1964). ROYER *et al.* (1978) décrivent un groupement à *Sphagnum angustifolium* comme transitoire du comblement des gouilles et initiateur des buttes du *Sphagnetum magellanici*. Notre replat à *Sphagnum angustifolium* et *Andromeda polifolia* en bordure de la butte est assimilable à ce groupement transitoire. Il est comparable au *Sphagnetum magellanici* à *Sphagnum recurvum ssp. amblyphyllum* et *angustifolium* décrit par MATTHEY W. (1964) au Cachot et similaire au groupement initial à *Sphagnum angustifolium* et *Sphagnum apiculatum* de JENSEN (1961) dans le Harz.

Selon l'interprétation de ROYER *et al.* (1978), cette série doit évoluer vers la tourbière boisée à pins à crochet (*Pino mugo-Sphagnetum* Kästn. und Flöss. 33). Nos observations nous font plutôt conclure sous forme interrogative puisque, si cette voie a belle et bien été observée localement, il semble que la majorité des anciennes fosses passe par une phase forestière dominée par *Betula pubescens*.

3.5. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Bien que descriptive et liée à une stratégie statistique d'échantillonnage raisonnée (le transect), nous constatons que l'étude de la végétation permet tout de même, pour la série aquatique, de montrer l'évolution d'un stade à l'autre. Pour les séries terrestres des touradons et des gazons de mousses, l'augmentation de la couverture en sphaignes pour la description des stades est

Figure 35 bis: Dynamique de la recolonisation végétale en relation avec les fosses



démontrée. Nous ne reviendrons pas ici sur les discussions menées en relation avec les différentes perceptions du dynamisme de ces milieux secondaires mais nous rappellerons simplement que pour nous, la notion de "lande de dégradation" doit être abandonnée. L'appellation de lande correspond à la structure du milieu et à la présence de la strate chaméphytique. Dès lors, comme le montre les résultats de la typologie, la cicatrization des milieux secondaires initie régulièrement de telles structures, qu'il y ait régénération par les sphaignes ou non. Il faut alors distinguer les landes sèches des landes dynamiques.

Les descriptions végétales montrent que pour les trois séries, il y a **convergence des réponses des milieux qui évoluent vers des formes plus ou moins pures et caractéristiques du *Sphagnion magellanicum***.

Pour la série des marais tremblants, outre cette constatation liée à la succession végétale, la description et l'analyse détaillée des trois transects montrent parfaitement l'évolution dynamique conjointe au centre et en bordure des fosses. Au centre de la fosse elle-même, la comparaison des stades illustre les changements de végétation. Ils découlent des modifications du dynamisme de la croissance verticale qui provoque une structuration du sol et de petites modifications du régime hydrique. La composition végétale de toute la fosse évolue directement en fonction des changements de conditions écologiques générales. Par contre, la bordure de la fosse présente une évolution différenciée entre les arbres et le sous-bois dont l'analyse des transects permet de tirer tous les renseignements importants. La figure 35bis illustre cette dynamique végétale des fosses.

Aux stades 1 et 2, il y a une excellente séparation marais-forêt avec des espèces exclusives, groupées sur des centres de gravités écologiques bien marqués. Le long du transect, *Sphagnum magellanicum*, *Calluna vulgaris* et *Vaccinium uliginosum* disparaissent à la même position, faisant immédiatement place à *Potentilla palustris* et *Equisetum fluviatile*. Seule *Sphagnum angustifolium* montre une petite transition entre les deux milieux. *Eriophorum vaginatum* est peu représenté mais avec une répartition large.

Au stade 3 déjà, le mélange des espèces est plus important avec *Vaccinium uliginosum* et *Carex lasiocarpa* qui se superposent au delà de l'ourlet. Il y a mise en place d'une véritable lisière, respectant la définition de l'écotone quant à la diversité spécifique. Du point de vue de la dynamique de la régénération, *Sphagnum flexuosum* commence à coloniser le sous-bois forestier alors que l'on trouve *Sphagnum magellanicum* en position pionnière au centre de la fosse. *Eriophorum vaginatum* est strictement lié à la forêt.

Enfin, le stade 4 permet de mettre en évidence le double complexe de la forêt avec une partie sèche, sans sphaignes et une partie dynamique en relation directe avec la lisière elle-même différenciée en deux écotones. La présence de *Sphagnum magellanicum* au centre de la fosse est plus importante et permet l'apparition des autres espèces différentielles du *Sphagnion magellanicum*. *Eriophorum vaginatum* trouve de bonnes conditions au centre de la fosse grâce à l'affermissement du sol et peut-être aux conditions hydriques un peu moins drastiques.

4. PEDOLOGIE

INTRODUCTION

L'approche pédologique a été menée par une description de chaque sol identifié. Outre les paramètres pédologiques classiques, certaines méthodes spécifiques aux tourbes ont été utilisées pour mesurer des paramètres de base (taux de fibres selon LEVESQUE & DINEL 1977). Pour le site de Bellelay (série des marais tremblants), nous avons de plus procédé à une analyse complète de la composition botanique détaillée le long des trois transects décrits pour la végétation (cf. chap. 3.4.3.) afin de compléter avantageusement l'image des profils, trop superficiels pour permettre une interprétation historique de la recolonisation végétale.

Une série d'analyses multivariées complète l'approche classique afin de définir les degrés de relation entre les horizons en fonction des différents types de paramètres mesurés. Enfin nous avons abordé les corrélations entre paramètres.

4.1. METHODE

Les méthodes sont détaillées au chapitre 1.3. et aux annexes 4 et 5. Nous n'y reviendrons pas ici. Nous signalerons simplement l'impossibilité de prélever des échantillons structurés au moyen du cylindre de Burger pour la série des marais tremblants. Nous n'avons donc pas de mesure de porosité ou de densité pour ces sols.

4.2. DESCRIPTION CLASSIQUE DES SOLS ET TYPOLOGIE

4.2.1. Introduction

Les sols décrits sont en relation étroite avec l'histoire humaine récente et en particulier l'impact des travaux d'extraction de la tourbe au cours de la Seconde Guerre Mondiale. S'il y a plus de 50 ans, la quasi totalité des stations que nous avons décrites présentaient vraisemblablement des histosols fibriques à tourbe épaisse avec un processus de tourbification active, les modalités et l'intensité des exploitations ont profondément modifié ces caractéristiques. L'évolution de chacun des sols étudiés a provoqué d'importantes modifications des caractères pédologiques initiaux, sans obligatoirement aller dans le sens d'une dégradation de la matière organique abandonnée.

La caractérisation actuelle de ces sols ainsi que leur mode de fonctionnement devront non seulement tenir compte des conditions actuelles mais également passées, afin d'en comprendre l'organisation, l'évolution et le rôle dans le processus de régénération.

Pour la nomenclature, nous nous appuyons sur le Référentiel Pédologique des principaux sols d'Europe (AFES, 1992) qui traite en détail des sols tourbeux (HISTOSOLS), en particulier sous l'angle de l'influence des atteintes humaines.

Considérant notre manque de connaissances sur la nature et l'importance des interventions humaines et par conséquent de l'état des tourbes de chaque station à l'achèvement des exploitations de

tourbe, la nomenclature liée au diagnostic est parfois délicate. De plus, l'importance relative de certains "horizons d'altération" de la tourbe n'est pas facilement mis en évidence du point de vue nomenclatural, eu égard à l'ensemble du solum.

4.2.2. Caractéristiques générales des sols

Selon notre définition de base de la régénération, les sols décrits sont tous issus de substrats tourbeux dont les horizons superficiels, abritant la végétation vivante primaire et la tourbe la plus jeune, ont été éliminés par décapage actif. Trois catégories principales d'interventions peuvent être mises en évidence. Elles illustrent parfaitement les systèmes terrestres et aquatiques résultant de notre typologie générale des milieux.

- 1° La tourbière a été préparée pour une exploitation qui n'a pas réellement eu lieu, ou sur une faible épaisseur. Dans ce cas, la couche de tourbe résiduelle est grande et l'évolution du sol s'est déroulée en conditions **ombrogènes**, hors de l'influence d'écoulements hydriques latéraux ou du substrat minéral imperméable. Du point de vue de la typologie des milieux (MULHAUSER *et al.* 1992), ces portions de tourbières sont groupées sous le terme de "marais secondaire élevé".
- 2° La tourbière a été exploitée sur une grande épaisseur et sur une vaste surface. L'abandon de l'exploitation est dicté par l'aspect qualitatif du matériau. Dès lors, très souvent la couche résiduelle est suffisamment mince pour provoquer une perte de l'isolement entre la végétation et le substrat minéral. Les conditions hydriques sont très variables et dépendantes de la superficie des secteurs exploités, de la topographie générale, si bien que l'on rencontre à la fois des stations en conditions **soligènes** et **ombrogènes**. Du point de vue typologique, on parle alors de "marais secondaire abaissé".
- 3° La tourbière a été profondément exploitée, comme dans le deuxième cas, mais sur des surfaces faibles, provoquant des fosses parfois importantes. Etant entourées de masses de tourbe en place, ces fosses se remplissent d'eau, qui est le facteur écologique évolutif principal dictant les premières caractéristiques du solum. Dans nos stations, étudiées à la tourbière de Bellelay, les sols évoluent en conditions **soligènes** pour les moins évolués et **ombrogènes** pour les horizons supérieurs des plus évolués.

Selon le Référentiel Pédologique, nous nous intéressons avant tout aux **histosols** rajeunis, pour lesquels le processus de tourbification est réamorcé.

Si les deux premiers types peuvent bien être rattachés à notre système "terrestre" et le troisième à notre système "aquatique", tous nos solums sont avant tout hydromorphes et caractéristiques des **histosols**. Actuellement, le caractère d'hydromorphie est non seulement variable d'un système à l'autre, mais également au sein des deux séries terrestres, en relation étroite avec les caractéristiques de la nappe.

Pour les deux séries "terrestres", les caractéristiques des sols (épaisseur résiduelle de la tourbe, relation avec la nappe et influence du substrat minéral) sont en relation étroite (mais non exclusive) avec la végétation qui caractérise ces types de milieux. Pour la série des marais tremblants, dans les fosses, la qualité chimique de l'eau d'infiltration et le niveau de l'aquifère sont prépondérants pour expliquer la végétation initiale et son évolution.

Considérant l'âge de ces sols et de ces groupements végétaux, les relations sol-végétation sont encore assez lâches et très peu stabilisées. Bien souvent, elles sont liées à de nombreux paramètres externes, comme le drainage, l'influence des pratiques agricoles, ou internes comme la composition botanique de la tourbe ou encore les conditions climatiques locales. Pour les marais secondaires abaissés, un même sol peut abriter plusieurs types de végétation et inversement, et ce sur de vastes surfaces. Cette considération est moins vraie pour les marais élevés, tous ombrogènes, dont l'évolution végétale secondaire est principalement liée au drainage superficiel. Ainsi, les conditions extrêmes offertes par les bords de murs d'exploitation, très fortement asséchés en surface, limitent singulièrement les groupements végétaux de cicatrisation, si bien que sur ce type particulier de sols tourbeux élevés, les gazons de mousses sont régulièrement observés. (c.f. chap. 2.2.)

4.2.3. Remarques sur les sols décrits

L'organisation de la deuxième partie de ce travail concerne:

1° Trois séries évolutives. Chacune permet de décrire une voie de la régénération pour laquelle nous formulons l'hypothèse d'une succession dynamique.

2° Pour chaque série, quatre stades ont été retenus. Nous les distinguons par les modifications de la végétation, celle-ci présentant un degré évolutif identique d'une série à l'autre. Le choix des stations d'échantillonnage a été effectué sur la base de notre inventaire jurassien et la connaissance détaillée d'un certain nombre de hauts-marais. Dès lors, pour limiter le temps d'investigation, nous avons délibérément choisi **une station** illustratrice de chaque stade pour la description du profil détaillé et les prélèvements pour analyses. Cette démarche limite fortement l'extrapolation mais garantit une confrontation exacte des résultats pédologiques avec l'hydrodynamique, la micrométéorologie et la productivité des sphaignes, dont les mesures ont été effectuées conjointement sur les mêmes stations.

Ainsi, nous décrivons en détail **douze profils**. L'annexe 7 permet de synthétiser cette organisation par rapport à la localisation géographique des stations.

4.2.4. Description des profils

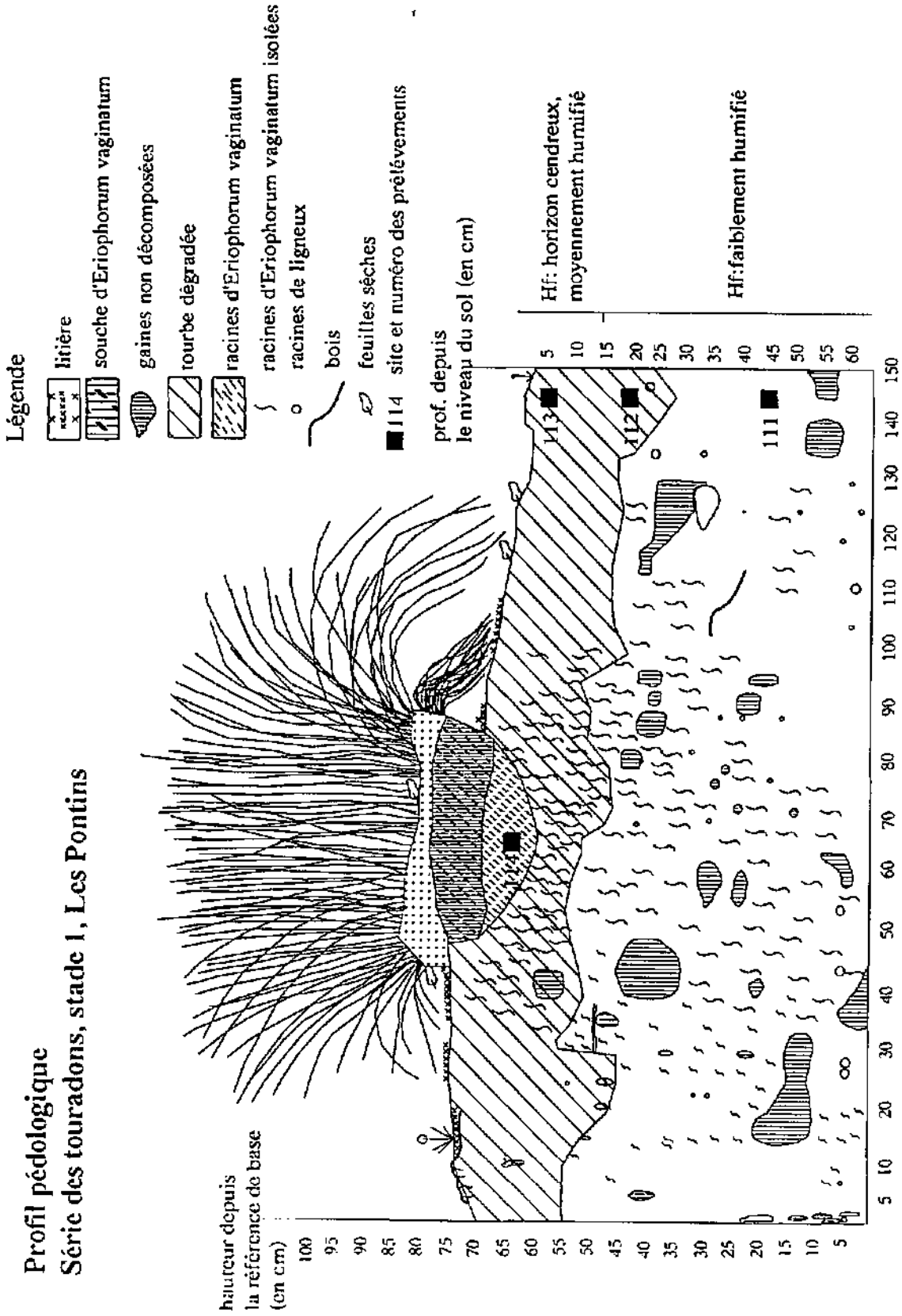
4.2.4.1. Série des touradons, stade 1, Les Pontins

Stade pionnier de notre première série terrestre, le solum des Pontins est épais et issu de la partie centrale de la tourbière, sur le site d'un ancien *Pino mugo-Sphagnetum* dont la surface initiale a été abaissée d'environ 1 mètre entre 1936 et 1951 (BUTTLER & CORNALI, 1983). Lors du travail phytosociologique précité, l'état de la végétation date de 1977 et indique clairement qu'à cette époque, les touradons d'*Eriophorum vaginatum* étaient déjà caractéristiques de cette surface. Le sol y est en légère pente, avec la pinède primaire en amont. On y décele une érosion assez importante, principalement lors de la fonte des neiges quand le sol est totalement gorgé d'eau.

Le profil détaillé est illustré sur la figure 36 et les résultats présentés au tableau 10.

Ce sol est typique du centre d'un haut-marais, dont l'épaisse tourbe oligotrophe garantit un isolement de la végétation du substrat minéral profond, non atteint par la description. C'est un sol très acide, pauvre en éléments minéraux et très fibreux. Il est très peu dense et possède une remarquable capacité de rétention en eau.

Figure 36: Profil pédologique, stade 1, série des touradons



Un niveau de saturation hydrique a été mis en évidence dans la couche de fond, avec une profondeur moyenne aux environs de 20 cm et des fluctuations moyennes. Il est en relation avec une "nappe perchée" temporaire, imbibant rapidement la couche supérieure, principalement dans les secteurs de tourbe nue entre les touradons, avant de saturer la base ou de s'assécher par évaporation.

Caractéristiques principales

Comme le montre la représentation du profil, nous avons pu distinguer deux horizons parallèles, séparés par une limite nette. Sous le touradon, nous distinguons nettement une loupe de radicelles importante. L'horizon de surface a une couleur brun-noir et une texture fibreuse assez fine. Sous cette couche, il y a uniformité avec une couleur brun-rouge et un touché très fibreux. Nous avons prélevé la partie supérieure de l'horizon de surface et sa partie inférieure distante de 15 cm environ afin de mettre en évidence un éventuel gradient.

La teneur en eau est élevée (>80%) et augmente avec la profondeur. En surface, elle est sensiblement plus élevée sous le touradon, attestant le rôle protecteur de ce dernier face à l'assèchement par évaporation et l'importante conduction hydrique des radicelles. Elle atteint 95% à 50 cm de profondeur ce qui est tout à fait comparable aux sols gorgés d'eau des marais tremblants et atteste la présence de la saturation hydrique de profondeur.

La granulométrie présente une nette dominance de la fraction 200 à 2000 μm , avec encore une légère augmentation vers la profondeur au détriment de la fraction > 2000 μm . Sous le touradon, il y a une forte augmentation des grandes fibres, représentée par des racines et radicelles d'*Eriophorum*. Ce fait est parfaitement corrélé à la composition botanique qui indique la plus grande proportion d'herbacés pour cet horizon. La fraction fine (0 à 50 μm) augmente également avec la profondeur. Mis en relation avec la composition botanique, ce fait est intéressant car il montre que le haut de l'horizon de surface, exposé à l'oxydation, présente une forte fraction de petites fibres (200 à 2000 μm), composée d'une grande proportion de macroagrégats. Cette agrégation est plus à mettre en relation avec une évolution pédologique dominée par les alternances climatiques (gels et dégels) et hydriques (inondations et assèchements répétés) subis par l'horizons que par une réelle évolution de la matière organique, liée à un fonctionnement pédologique global. Pour nous, il indique également l'évolution actuelle de cet horizon de surface et sa dégradation progressive. Cette proportion d'agrégats n'existe déjà plus au bas de l'horizon.

Considérées en commun, les deux fractions supérieures donnent un taux de fibres continuellement au-dessus de 80% attestant bien le caractère fibrique de l'ensemble du profil.

L'indice de décomposition au pyrophosphate de sodium (indice pyro par la suite) présente des valeurs moyennes à élevées avec une nette différenciation entre la surface ouverte, déjà fortement décomposée et les autres horizons. En particulier, sous cette couche exposée, à 15 cm de profondeur seulement, l'indice est 2 fois moins élevé et présente un chiffre comparable à un sol de pinède de haut-marais. Ici donc, l'indice de décomposition chimique montre déjà clairement l'évolution de cet horizon, alors que le taux de fibres n'est pas encore modifié.

Tableau 10: Résultats pédologiques, stade 1, série des touradons

Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 1

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice		cendres (%)	M.O. (%)
			eau	KCl		>2000 µm	0.2-2 mm	50-200 µm		0-50 µm	pyro		
	butte	110											
	Hf	114	3.9	2.6	88.1	13.6	68.0	2.8	15.6	22.5	3.63	10.5	89.5
	Hf	113	4.2	2.6	82.8	5.3	78.0	7.8	8.9	34.1	2.44	14.1	85.9
	Hf	112	4.3	2.8	91.8	8.6	71.6	4.8	13.0	15.3	5.37	2.4	97.6
	Hf	111	4.6	3.2	94.6	3.6	83.1	2.3	11.0	20.6	4.21	2.6	97.4

Hor.	échant.	prof. (cm)	Éléments mobilisables						rapport ca/mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
			Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	CEC (meq/100g)							
	butte	110												
	Hf	114	0.21	0.08	0.03	0.10	119.2	2.60	0.87	49.7	6.17	57.0	1.48	
	Hf	113	0.10	0.09	0.06	0.07	115.3	1.10	1.46	50.1	6.56	34.2	1.56	
	Hf	112	0.16	0.08	0.01	0.05	110.4	1.90	0.62	48.8	6.21	79.3	1.52	
	Hf	111	0.31	0.11	0.02	0.09	103.4	2.80	0.44	48.3	4.93	109.6	1.21	

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité			densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative de la fraction fibreuse									
			totale (%)	macro (%)	mésomicro (%)		capacité de rét. en eau (%)	sphaériques (%)	mousses (%)	herbes (%)	ligneux (%)	bois (%)	agrégats (%)			
	butte	110														
	Hf	114	91.6	8.4	29.2	0.16	560.3	49.5	0.0	39.1	4.1	0.8	6.5			
	Hf	113	98.4	9.4	50.0	0.09	1133.6	38.7	1.2	33.9	3.3	0.4	22.6			
	Hf	112						58.3	1.5	31.3	5.4	0.6	3.0			
	Hf	111						72.3	1.2	9.9	9.5	0.0	7.2			

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

Le taux de cendres montre un saut bien marqué entre la surface et la profondeur et ce, autant sous le touradon que pour l'horizon exposé. L'augmentation en surface est importante avec un facteur de 6 fois sur 15 cm de profondeur.

Cette accumulation en surface est confirmée par une CEC plus élevée pour les deux horizons de surface, avec une valeur plus haute pour la zone d'activités racinaires principale du touradon. LEVESQUE & DINEL (1977) indiquent que la CEC varie de façon inversement proportionnelle à la taille des particules. Nous n'avons pas mesuré ici la capacité d'échange pour chaque fraction granulométrique mais cette information est à mettre en relation étroite avec la différence de valeur des deux horizons de surface. Sous le touradon, la proportion de particules fines est nettement plus élevée que pour l'horizon ouvert; il a aussi une CEC plus grande alors que le taux de cendres et l'indice pyro indiquent une décomposition plus importante de la tourbe entre les touradons. LEVESQUE *et al.* (1981) ont également mis en évidence une discordance entre la décomposition exprimée par l'indice pyro et la CEC, et ce en fonction de la composition botanique différente des tourbes. Ici, l'échantillon prélevé sous le touradon possède une proportion d'herbacés et de sphaignes plus importante que l'horizon exposé de la surface.

Les analyses chimiques ne montrent pas une augmentation notable des cations mobilisables dans les horizons de surfaces. On peut toutefois noter une diminution du calcium dans l'horizon de surface exposé et une augmentation du potassium. L'absence de sphaignes, l'origine des horizons composant actuellement la surface ainsi que les transports d'éléments par les mouvements hydriques ne permettent pas de mettre en évidence l'augmentation de concentration de calcium telle que présentée par DAMMAN (1978) et CLYMO (1983) dans sa synthèse sur la tourbe.

Le rapport C/N augmente avec la profondeur et est notablement plus bas (34) dans l'horizon de surface ouvert qu'en profondeur où il atteint 110, valeur la plus élevée de tous nos horizons.

Malgré une signature de dégradation déjà bien marquée, la surface exposée présente encore une densité apparente très faible et une remarquable capacité de rétention en eau. La porosité totale est particulièrement élevée tout comme la proportion d'eau extraite des mésopores moyens. Comparés aux valeurs fournies par le centre du touradon lui-même, on peut dire que l'écoulement et le stockage de l'eau se fait préférentiellement par la tourbe.

La tourbe des Pontins reflète parfaitement son origine par une composition botanique mixte entre les sphaignes et les herbes, principalement *Eriophorum vaginatum*.

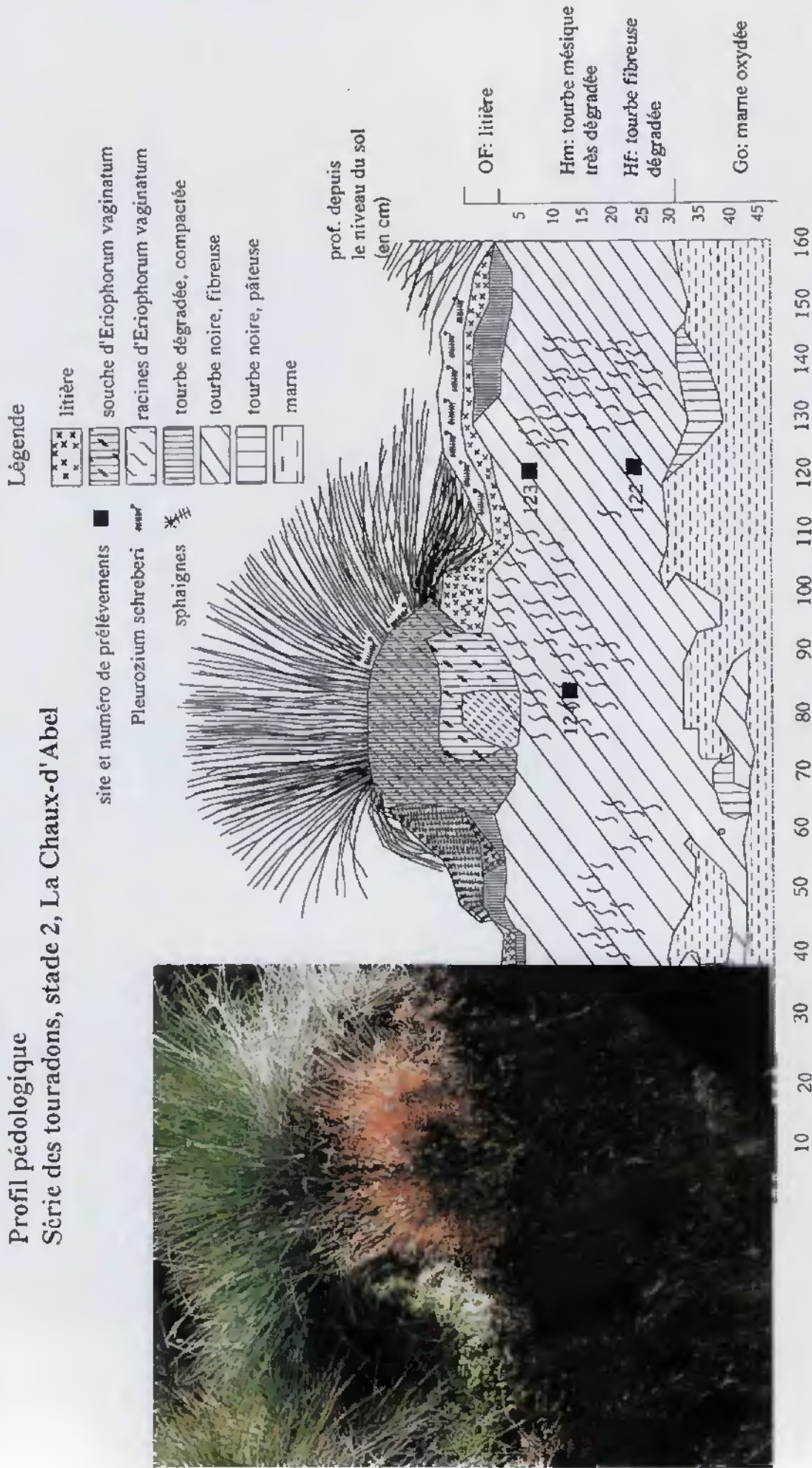
Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE, hérité, productif, ombrogène, oligotrophe, à muscinés

Profil pédologique

Série des touradons, stade 2, La Chaux-d'Abel

Figure 37: Profil pédologique, stade 2, série des touradons



4.2.4.2. Série des touradons, stade 2, La Chaux-d'Abel

Contrairement au sol des Pontins, ceux décrits à La Chaux-d'Abel ont été très fortement influencés par l'activité humaine et ce, à partir d'une position originelle un peu différente. En effet, l'épaisseur initiale de la tourbe n'a jamais été importante vu la proximité naturelle de la doline marquant la limite du haut-marais. De plus, l'homme a provoqué un décapage total de la surface sur une vaste surface depuis le bord du marais jusque loin en profondeur, créant un marais secondaire abaissé caractéristique. Par le creusage de nombreuses rigoles de drainage en réseau efficace, il a singulièrement augmenté le drainage latéral naturel de cette bordure, favorisant encore l'évolution des sols. Il n'est ainsi pas possible de mettre en évidence une nappe phréatique, attestant d'un remplissage total des pores.

D'après les informations recueillies auprès des propriétaires, l'exploitation a eu lieu principalement entre 1939 et 1945 et s'est poursuivie jusqu'en 1960-63 sur certaines surfaces. Comme aujourd'hui il ne reste plus aucune zone dénudée, il est impossible de dater notre station avec plus de précision.

Les résultats sont présentés au tableau 11 et le profil dessiné sur la figure 37.

Caractéristiques principales

Vu l'épaisseur résiduelle faible de la tourbe (40 cm environ), le profil permet de décrire la totalité des horizons organiques, jusqu'à l'horizon minéral. Outre une mince couche en surface, noire et grumeleuse au toucher sous la litière, le solum ne montre pas une réelle différenciation d'horizons. On retrouve la loupe d'enracinement sous le touradon alors qu'au fond la limite avec l'horizon minéral est assez nette mais non plane. Quelques petites zones de contact sont apparues comme pâteuses et collantes alors qu'en profondeur, une petite veine était très fibreuse avec des restes de sphaignes bien visibles (inclusion). L'horizon minéral lui-même est parcouru par de nombreuses racines et présente une couleur brunâtre. Vu l'absence régulière de saturation hydrique au niveau de cet horizon, nous le considérons comme oxydé. Comme pour le stade 1, les échantillons ont été prélevés en extrême surface, en différenciant la zone à litière et la zone couverte de mousses, sous le touradon dans la loupe de radicelles, et en profondeur, en distinguant l'horizon H et l'horizon Go.

Ainsi, le taux d'humidité est nettement plus faible en surface qu'en profondeur au niveau des horizons H. Le Go est particulièrement sec (prélèvement début août). Comme au stade 1 la loupe de radicelles permet les remontées capillaires ou une meilleure pénétration des eaux de pluies et présente une humidité un peu plus haute.

L'entier du profil montre une décomposition avancée de la tourbe avec comme corollaire, un taux de fibres bas pour les horizons de surface, mésiques sauf pour l'échantillon prélevé sous les mousses qui est à la limite inférieure de la classe fibrique. En profondeur, bien que proche de la marne, la tourbe reste nettement plus fibrique avec une proportion de fraction 200 à 2000 μm très importante. L'horizon Go recèle 74% d'éléments fins entre 0 et 50 μm et 17% de radicelles et racines formant la fraction 200 à 2000 μm .

L'indice pyro est élevé avec un gradient descendant vers la profondeur et une protection marquée par la couche de mousses.

Tableau 11: Résultats pédologiques, stade 2, série des touradons

Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 2

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice		condrus (%)	M.O. (%)
			eau	KCl		>2000 µm	0.2-2 mm	50-200 µm		pyro	REG		
	120												
butte	125	0-5	4.2	2.8	74.5	2.7	37.6	32.9	26.8	40.3	57	24.2	75.8
Hf	123	2-7	4.1	2.8	73.8	3.0	43.8	24.9	28.3	46.8	48.7	22.9	77.1
Hf	124	10-20	3.9	2.8	78.5	4.5	37.5	30.6	37.4	32.0	47.6	14.1	85.9
Hf	122	17-22	4.2	2.8	82.6	4.1	65.7	7.4	22.9	69.8	38.8	16.9	83.1
Co	121	40-45	5.1	3.6	59.1	0.5	17.3	8.4	73.8	17.7	nd	78.6	21.4

Éléments mobilisables												
Hor.	échant.	prof. (cm)	CEC (meq/100g)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	rapport Ca/Na	N		C/N	H/C
									(%)	(%)		
	120											
butte	125	0-5	129.3	0.05	0.10	0.07	0.06	0.50	2.40	49.8	20.8	1.55
Hf	123	2-7	127.9	0.02	0.08	0.05	0.04	0.30	2.02	50.6	25.0	1.46
Hf	124	10-20	124.9	0.11	0.07	0.04	0.05	1.60	2.07	52.5	25.3	1.47
Hf	122	17-22	128.8	0.20	0.07	0.03	0.05	2.70	1.38	51.5	37.3	1.38
Co	121	40-45	63.6	0.003	0.40	0.50	0.09	0.008	0.57	11.4	20.0	1.77

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité			densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative								
			totale (%)	macro (%)	méso (%)		capacité de rét. en eau (%)	sphaériques (%)	mousses (%)	herbes (%)	ligneux (%)	bois (%)	agrégats (%)		
	120														
butte	125	0-5	88.3	16.0	42.7	0.12	725.0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Hf	123	2-7	86.8	5.6	29.9	0.21	417.0	0.0	2.1	30.5	0.5	1.7	65.2	1.7	65.2
Hf	124	10-20						0.0	5.8	35.2	1.1	3.6	54.3	3.6	54.3
Hf	122	17-22	91.3	6.5	28.5	0.1	654.7	0.0	6.2	55.6	3.3	3.5	31.5	3.5	31.5
Co	121	40-45						0.0	3.8	41.5	3.6	3.0	48.1	3.0	48.1

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

La CEC est partout élevée dans l'horizon organique et assez basse au niveau de l'horizon Go mais la comparaison est aléatoire vu la forte différence de densité. La surface présente un taux de cendres très haut (23-24%), plus faible sous le touradon et encore très faible pour l'échantillon de profondeur, malgré la proximité de l'assise de Go. La comparaison est néanmoins difficile vu les différences de densité entre les deux horizons.

Les analyses chimiques indiquent une concentration du calcium au niveau profond de l'horizon H alors que la marne est totalement décalcifiée. Le potassium diminue vers la profondeur tout comme le magnésium pour l'horizon tourbeux alors qu'au niveau minéral, ils sont particulièrement élevés. Ce fait a déjà été relevé par GOBAT (1984) pour un sol similaire couvert de *Molinia caerulea*.

Le rapport C/N est faible avec sa valeur la plus haute au bas de l'horizon H, ce qui n'est pas surprenant.

Le touradon analysé présente une densité un peu plus faible que celui des Pontins avec des macropores et des mésopores moyens un peu plus important. Ici, il contraste fortement avec la surface de la tourbe dénudée, nettement plus dense et ayant plus de micropores. Entre les touradons, la tourbe de surface présente une capacité de rétention en eau particulièrement faible (2.7 fois inférieure à la surface des Pontins). En profondeur, la densité diminue un peu alors que le volume des macropores et des mésopores moyens est sensiblement le même. La porosité totale est par contre relativement plus élevée. Aucune nappe phréatique n'a été mise en évidence.

La composition botanique de la tourbe est par contre totalement différente du stade I avec une absence totale de sphaignes et une forte proportion de macroagrégats avec des composés herbacés. Comme déjà indiqué, une inclusion particulière de tourbe à sphaignes a été identifiée au contact de la marne. Il est très difficile de définir avec précision si la tourbe a été remaniée au cours des travaux d'extraction avec des dépôts étrangers à la station ou si cette inclusion atteste la présence passée de ces mousses alors que la tourbe était très mince.

Considérant ces résultats, le diagnostic peut être considéré sous deux formes:

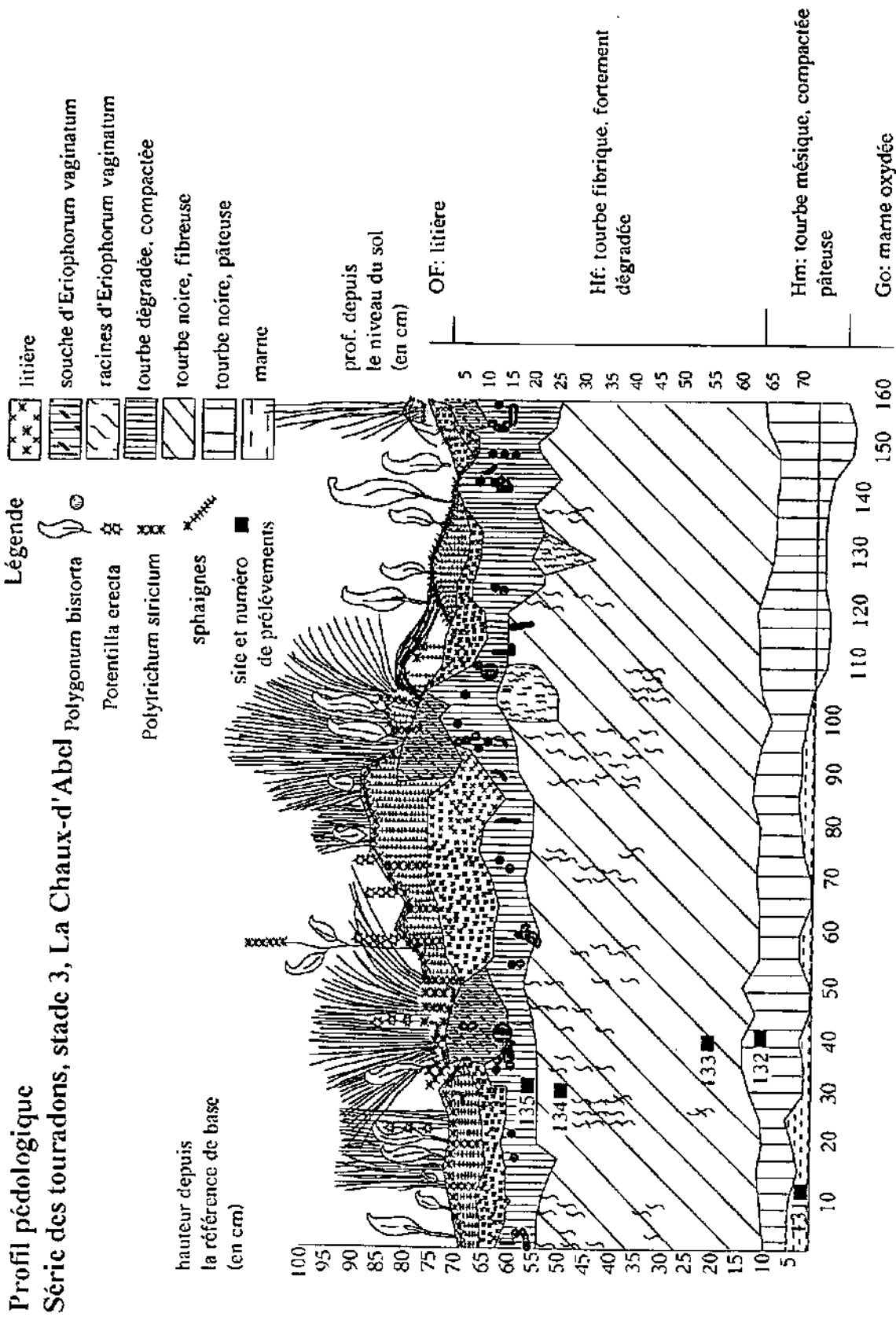
1° On privilégie les conditions initiales de formation en considérant que l'on est en présence d'un haut-marais transformé (malgré le solum superficiel). Dans ce cas le diagnostic possible est:

HISTOSOL LEPTIQUE, hérité, à hydromorphie fossile, soli-ombrogène, sur horizon réductique, avec un rajeunissement fragmentaire.

2° On privilégie les conditions actuelles en relation avec l'évolution potentielle. dans ce cas on considère que le caractère d'hydromorphie est temporaire ce qui donne:

REDUCTISOL TYPIQUE histique, à hydromor, à nappe perchée d'origine pluviale et à horizon rédoxique peu taché à argile humifère.

Figure 38: Profil pédologique, stade 3, série des touradons



4.2.4.3. Série des touradons, stade 3, La Chaux-d'Abel

Situé à proximité du deuxième stade, les conditions initiales et secondaires de ce sol sont sensiblement les mêmes. Placé plus près du centre originel du haut-marais, l'épaisseur initiale de la tourbe devait être plus grande. Actuellement, le sol est sensiblement plat entre les stades de La Chaux-d'Abel si bien que les différences d'épaisseur des horizons organiques résiduels sont principalement dues aux légers vallonements du substrat minéral.

Le stade 3 présente une couche de matière organique d'environ 60-65 cm que l'on peut différencier en quatre horizons bien distincts. Sous cette matière organique, l'horizon minéral subit des fluctuations hydriques importantes (absence de saturation hydrique comme au stade 2), mais présente une couleur bleu-verdâtre sans tache d'oxydation. Son sommet organo-minéral est nettement plus plat qu'au stade précédent avec cette fois la différenciation d'un horizon d'intégration parallèle à la surface argilo-limoneuse et de faible épaisseur (10 cm environ). Au-dessus, comme pour le stade 2 un horizon assez épais, fibreux à pâteux, de couleur brun-noir, constitue la masse principale du profil. A son sommet, deux petites loupes de radicelles ont été identifiées. Posé par dessus, un petit horizon organique noir grumeleux évolue en condition d'aérobiose maximale. Il représente la zone d'enracinement préférentielle des espèces herbacées compagnes d'*Eriophorum vaginatum*. Sur le sol lui-même, une litière fragmentaire de sphaignes non décomposées fait la transition avec les coussinets de sphaignes qui reprennent progressivement possession des zones ouvertes et des touradons eux-même.

Cinq échantillons permettent de caractériser le profil avec deux prélèvements pour l'horizon principal afin d'en détecter l'évolution vers la profondeur. La litière n'a pas fait l'objet d'une analyse alors que l'horizon argilo-limoneux a été prélevé.

Le profil est dessiné sur la figure 38 et les résultats rassemblés au tableau 12.

Caractéristiques principales

Ce profil est très proche de celui décrit pour caractériser le deuxième stade. Il s'en distingue par les caractéristiques suivantes:

L'acidité baisse dans la tourbe assez nettement au bas de l'horizon le plus épais pour être neutre dans l'horizon d'intégration.

L'horizon de surface possède une grande quantité de grandes fibres (>2000 µm) par la présence des racines d'herbacés et des grands grumeaux de tourbe. Le taux de fibres est ainsi surestimé si bien que la majorité du profil est "fibrique". Seul l'horizon d'intégration est mésique. La marne est beaucoup plus humifère ici puisque 34,4% est constitué de petites fibres. Sa composition exacte n'a pas été définie par observation.

Bien que le taux de fibres soit un peu plus haut en proportion, l'indice pyro présente des valeurs comparables voire plus grandes. Principalement pour le fond de l'horizon épais, très décomposé chimiquement alors que sa fraction de petites fibres est encore fortement représentée. Cette augmentation de l'indice pyro à la base de l'horizon fibreux principal est en relation directe avec le comportement de la nappe temporaire qui fluctue préférentiellement dans cet horizon.

Tableau 12: Résultats pédologiques, stade 3, série des touradons

Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 3

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du poids sec)			fibres (%)	indice pyro	indice REG	cendres (%)	M.O. (%)
			eau	KCl		>2000 µm	0-2-2 mm	50-200 µm					
	Hf	135	2-7	4-2	80.1	26.2	27.9	19.1	26.9	42.7	1.27	15.5	84.5
	Hf	134	10-20	4.6	83.9	3.8	43.2	13.0	39.9	39.1	1.20	19.1	80.9
	Hf	133	40-45	6.4	81.8	4.8	51.6	3.2	40.5	59.1	0.95	26.6	73.4
	Hm	132	65-70	6.9	76.2	2.8	34.7	3.0	59.5	45.4	0.83	43.1	56.9
	Go	131	70-80	7.4	34.7	0.2	34.4	18.6	46.8	nd	nd	94.9	5.1

Hor.	échant.	prof. (cm)	Éléments mobilisables										rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
			Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	CEC (meq/100g)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	rapport Ca/Mg						
	Hf	135	2-7	133.2	0.36	0.09	0.07	0.06	0.06	4.2	2.75	48.6	6.47	17.6	1.59			
	Hf	134	10-20	134.5	0.53	0.07	0.02	0.05	0.05	7.60	2.36	51.1	6.58	21.7	1.53			
	Hf	133	40-45	142.2	1.91	0.08	0.02	0.06	0.06	22.80	1.92	48.2	6.29	25.1	1.55			
	Hm	132	65-70	153.6	0.30	0.24	0.10	0.08	0.08	1.30	1.90	37.8	5.28	19.9	1.67			
	Go	131	70-80	21.3	0.05	0.38	0.57	0.11	0.11	0.10	0.04	1.5	0.48	39.3	3.83			

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité		capacité de rét. en eau		densité apparente (g/cm3)	composition botanique relative					
			totale (%)	macro (%)	mésos (%)	réf. en eau (%)		sphaignes (%)	mousses (%)	herbes (%)	ligneux (%)	bois (%)	agrégats (%)
	Hf	135	2-7	94.1	7.9	43.7	0.13	0.0	8.0	51.9	1.3	0.5	38.3
	Hf	134	10-20	94.1	3.2	27.4	0.16	0.0	6.7	59.3	1.4	1.8	30.7
	Hf	133	40-45					0.0	6.0	52.8	1.2	2.6	37.4
	Hm	132	65-70										
	Go	131	70-80										

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

Le taux de cendres augmente fortement avec la profondeur pour atteindre 43% dans l'horizon Hm au contact de la marne.

La CEC est haute et est bien corrélée avec la décomposition croissante vers la profondeur. Chimiquement, ce profil possède nettement plus de calcium que le stade 2, avec une très forte concentration à la base de l'horizon organique principal. Cette augmentation peut s'expliquer par la présence en surface de sphaignes vivantes et d'une couche de litière sur une bonne partie du sol. Il n'est pas exclu que l'on mette en évidence le rôle accumulateur de calcium des sphaignes mis en évidence par de nombreux auteurs et en particulier DAMMAN (1978), WAUGHMAN (1980), CLYMO (1983) et GOBAT (1984), avec une diffusion à travers le profil par les mouvements de l'eau. Vu la très faible concentration de calcium au niveau de la marne elle-même, il est exclu que cet élément apparaisse dans le profil par remontée capillaire depuis ce substrat. Pour les autres éléments (Mg et K en particulier), on retrouve les mêmes considérations que pour le stade précédent.

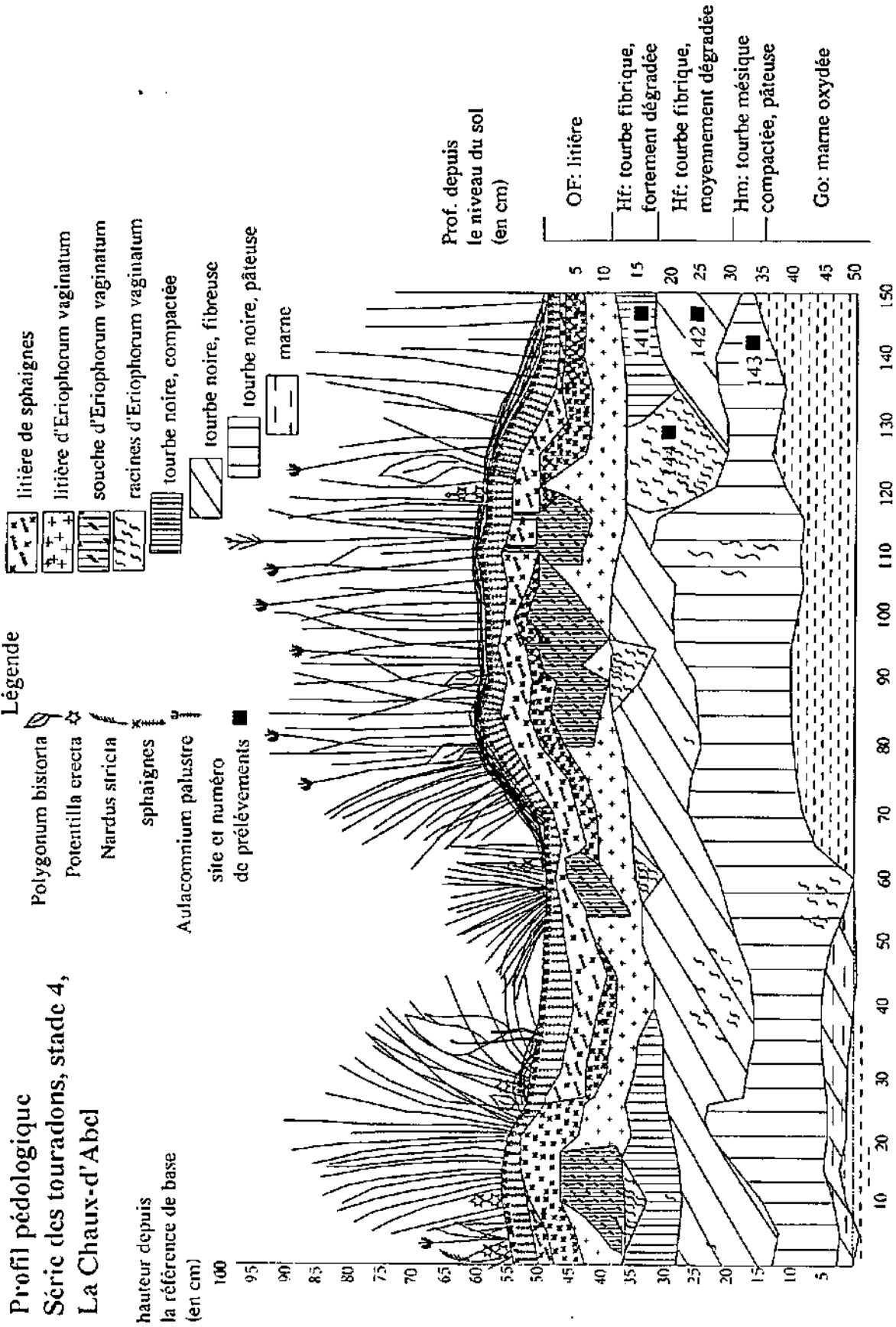
Le rapport C/N est presque identique à travers le profil mais très bas. Il est minimal sous la litière, dans l'horizon noir grumeleux (17.6) et également très faible dans l'horizon Hm (20). Pour la marne, la très faible concentration en azote pousse un peu la valeur vers le haut (40).

Vu sa structure grumeleuse, l'horizon de surface (testé pour la porosité et la compaction) présente une densité apparente plus faible et une capacité de rétention d'eau plus grande que la surface du stade 2 et que le haut de l'horizon Hf de ce profil. En particulier, la proportion de macropores et de mésopores moyens est élevée. En fait ici c'est l'horizon légèrement fibreux et relativement peu décomposé qui joue le rôle de réservoir hydrique, captant et écoulant l'eau moins facilement (macropores et mésopores nettement moins importants) que l'horizon supérieur "aéré" et grumeleux. Ces caractéristiques pédologiques n'influencent le fonctionnement hydrique ni suffisamment longtemps ni en quantité pour permettre la mise en place d'une véritable nappe permanente, mais sont déterminantes pour les sphaignes.

Comme pour le profil précédent, on pourrait envisager ici la double diagnose en tenant compte des conditions initiales ou des caractères présents. Néanmoins, vu l'épaisseur résiduelle plus grande (60-70 cm), nous ne retenons ici qu'un diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE leptique, rajeuni, à horizon profond mésique peu épais, réductique
--

Figure 39: Profil pédologique, stade 4, série des touradons



4.2.4.4. Série des touradons, stade 4, La Chaux-d'Abel

Spatialement situé entre les deux stades précédents, son histoire récente est la même. L'épaisseur de tourbe résiduelle est également très faible, avec seulement 30 cm. Malgré cette faible épaisseur, c'est le stade qui possède une nappe fluctuante pendant la plus longue partie de l'année. Comme le montre le profil de la figure 39, les sphaignes vivantes recouvrent l'entier de la surface y compris la totalité de la masse des touradons, dont les souches sont reconnaissables dans la masse de sphaignes et de litière de mousses. A ce stade, l'enracinement des herbacés compagnes d'*Eriophorum vaginatum* est localisé principalement au niveau de la litière. Sous cette litière, un premier horizon noir grumeleux est mis en évidence. Il est ici fragmentaire. Au-dessous, et remplissant les espaces libres entre les loupes de l'horizon précédent, nous mettons en évidence un horizon brun-noir à structure fibreuse dans lequel viennent se localiser les zones d'enracinement les plus denses d'*Eriophorum vaginatum*. Sous celui-ci, un horizon d'intégration organo-minéral assez épais et comparable à celui du profil précédent est bien mis en évidence avec une structure pâteuse et une couleur noire. Il montre une transition nette avec une marne gris-bleu bien mélangée à la matière organique dans sa partie supérieure.

Quatre échantillons ont été prélevés dans ce profil. Les résultats sont présentés au tableau 13.

Caractéristiques principales

Ce profil est également parfaitement comparable aux deux précédents. Nous n'en donnerons donc que les caractères essentiels et différenciateurs.

Le taux d'humidité est apparemment plus faible. Considérant les valeurs moyennes de la nappe phréatique, ce résultat sous-estimé est imputable à la période de prélèvement, choisie volontairement après une longue période de temps sec et chaud pour nous permettre de creuser la fosse dans de bonnes conditions.

Le caractère fibrique des horizons de surface est confirmé tout comme la forte diminution des fibres pour l'horizon d'intégration qui passe dans la classe mésique. Pour le pyro, confirmant les résultats des stades 1 et 2, l'indice est nettement plus bas sous le touradon, dans la zone de radicelles. Sinon, il marque également une baisse au niveau de l'horizon d'intégration, comme pour le stade 3. Pour le taux de cendres, l'horizon Hm présente une valeur très haute avec 50% de cendre, comparable à l'horizon homologue du stade 2.

Pour la CEC, l'horizon noir-grumeleux de surface présente la valeur la plus haute pour un indice pyro élevé et un taux de fibres faible. Si sa diminution sous le touradon semble bien corrélée avec la diminution de l'indice pyro et l'augmentation du taux de fibres, sa faible valeur apparaît comme surprenante pour l'horizon Hf qui présente un indice pyro très haut. En fait cet horizon est plus fibreux et comporte une fraction 0 à 50 μm moins importante. De plus sa fraction de petites fibres (50% du total) contient nettement moins de macroagrégats que l'horizon grumeleux supérieur. Dans ce sens, l'évolution de la CEC est en corrélation avec les résultats de LEVESQUE & DINEL (1977).

Chimiquement, ce profil confirme l'augmentation de la concentration en calcium en relation avec les sphaignes, puisqu'il possède la plus haute valeur au niveau des horizons situés immédiatement sous la litière de sphaignes alors que la loupe de radicelles, protégée par le touradon est un peu plus pauvre. Ce fait confirme les résultats de CHAPIN *et al.* (1979) qui indiquent la faible

Tableau 13: Résultats pédologiques, stade 4, série des touradons

Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 4

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice		cendres (%)	M.O. (%)
			eau	KCl		>2000 µm	0.2-2 mm	50-200 µm		0-50 µm	pyro		
Hf	141	5-10	4.5	3.7	67.9	3.0	41.8	7.8	47.4	50.8	0.88	21.1	78.9
Hf	144	10-15	4.5	3.9	72.2	2.5	50.7	18.4	28.5	39.2	1.36	33.4	66.6
Hf	142	15-20	5.1	4.0	78.9	3.1	50.0	4.2	42.7	57.4	0.93	28.3	71.7
Hm	143	20-30	5.9	5.2	75.8	1.0	34.1	8.6	56.4	46.8	0.75	50.1	49.9

Hor.	échant.	prof. (cm)	Éléments mobilisables						rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
			Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	CEC meq/100g	Ca/Mg						
Hf	141	5-10	0.33	0.08	0.05	0.06	134.1	4.10	2.10	50.2	6.18	23.8	1.47	
Hf	144	10-15	0.22	0.09	0.08	0.06	106.3	2.40	2.15	47.8	6.02	22.2	1.50	
Hf	142	15-20	0.41	0.09	0.06	0.07	106.7	4.80	1.94	49.6	6.06	25.5	1.46	
Hm	143	20-30	0.05	0.25	0.20	0.07	99.6	0.20	1.28	31.4	3.85	24.5	1.39	

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité		capacité de rét. en eau		densité apparente (g/cm3)	composition botanique relative					
			totale (%)	macro (%)	mésop. (%)	micro (%)		sphaériques (%)	filamenteuses (%)	herbes (%)	lignieux (%)	bois (%)	agrégats (%)
Hf	141	5-10	93.4	7.2	37.4	618.8	0.15	0.0	6.8	37.0	0.3	0.3	55.6
Hf	144	10-15						2.6	7.1	63.4	1.5	2.2	23.2
Hf	142	15-20						0.0	7.6	54.8	0.9	1.2	35.5
Hm	143	20-30						1.5	8.3	73.8	0.4	0.0	16.0

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

teneur en calcium dans les touradons d'*Eriophorum vaginatum* et de CLYMO (1983) qui signale la forte teneur de cet élément dans les sphaignes. MALMER (1988) compare les relations entre la quantité d'éléments fournis par les précipitations et la concentration de ces éléments dans les structures vivantes des sphaignes, la litière et finalement la lixiviation vers la tourbe. Pour lui, plus de 50% de l'apport en Ca est exporté du tapis de mousses vers la tourbe avant d'être incorporé dans la litière et de fait n'indique pas clairement de corrélation entre la teneur des éléments dans les sphaignes et celle de la tourbe. Néanmoins, il a fait ses analyses sur des sites naturels ayant une couverture sphagnale totale et continue et non pas sur des sols avec néoformation d'un tapis jeune après une forte perturbation humaine.

Comme pour le stade 3 il y a appauvrissement net au niveau de l'horizon Hm, avec inversion de la tendance pour Mg et K.

La densité, la porosité et la capacité de rétention en eau n'ont pu être mesurées que pour l'horizon de surface qui possède une densité apparente et une capacité de rétention en eau moyenne pour une macro- et une mésoporosité relativement élevées tout à fait comparable à l'horizon superficiel du stade 3. Lors de nos prélèvements, il n'a pas été possible de récolter correctement les horizons inférieurs à cause de l'inondation par la nappe qui masquait totalement les limites d'horizons.

Comme pour le stade 2, très peu épais, il est nécessaire ici de poser la question quant au choix de l'approche nomenclaturale. Considérant le niveau de la nappe, sa plus grande constance, ses mouvements et surtout le fait qu'une forte production par les sphaignes est bien visible, il est nécessaire de rattacher ce solum aux HISTOSOLS, sans tenir compte de l'aspect historique qui en a réduit très fortement son épaisseur.

Diagnostic:







HISTOSOL LEPTIQUE rajeuni, mésotrophe, ombrogène à horizon mésique peu épais sur horizon réductique





Figure 40: Profil pédologique, stade 1, série des gazons de mousses

Profil pédologique
Série des gazons de mousses, stade 1,
Martel-Dernier

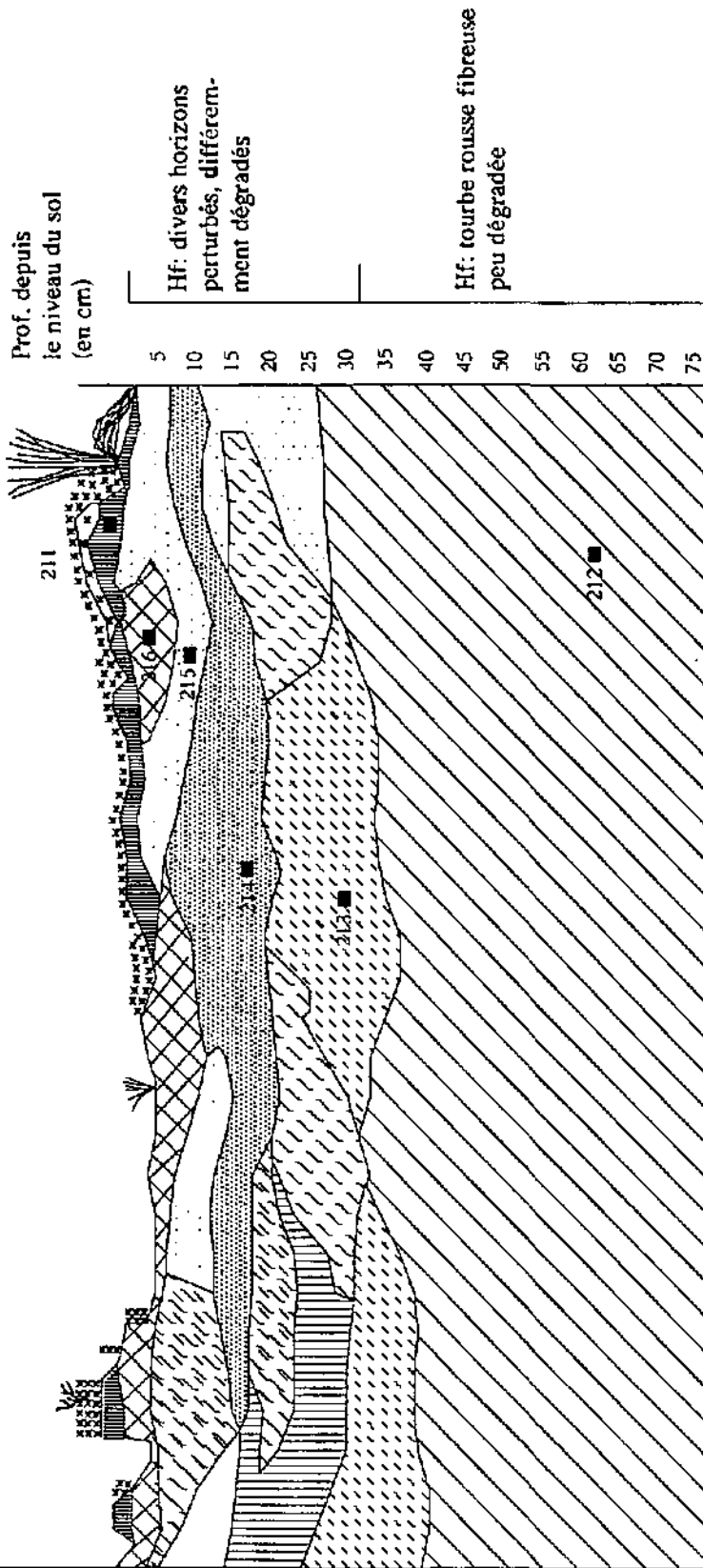
Légende

Pour les horizons analysés:

-  tourbe grise cendreuse
-  tourbe brune sèche, très fibreuse
-  tourbe brune, fibreuse
-  tourbe brune, sèche, pâteuse
-  tourbe noire, humide, pâteuse
-  tourbe brune rousse, fibreuse

-  *Polytrichum strictum*
-  *Calluna vulgaris*
-  *Eriophorum vaginatum*
-  site et numéro de prélèvements

hauteur depuis la référence de base (en cm)



4.2.4.5. Série des gazons de mousses, stade 1, Martel-Dernier

Ce sol est typique d'un marais secondaire élevé fortement perturbé. Placé en bordure d'un haut mur d'exploitation vertical un peu affaissé, il a subi depuis l'abandon des travaux de décapage ou d'entreposage un profond drainage latéral et une érosion de surface localement importante. Sa surface est ainsi légèrement en pente en direction du terrain agricole qui le borde. Cette évolution secondaire marque le profil depuis 45 ans environ puisque les travaux d'exploitation ont été abandonnés sur cette zone à la fin de la Seconde Guerre Mondiale.

L'épaisseur résiduelle est grande et le profil, creusé sur 80 cm environ, n'en a pas atteint l'assise argilo-limoneuse. De nombreux horizons de dégradation en mosaïque avec d'anciennes couches aux structures reconnaissables (loupes de gaines d'*Eriophorum vaginatum*, loupes de racines et de radicelles) ont été mis en évidence dans les 35 premiers centimètres. La limite inférieure de ces couches dégradées est nette et fait place à une épaisse couche de tourbe évoluée homogène fibreuse de couleur rousse sur une grande profondeur. Nous n'en avons mis en évidence que la partie supérieure. Les horizons de surface présentent des structures et des textures extrêmement différentes avec des zones pâteuses alternant avec d'autres très fibreuses, où les restes de sphaignes sont identifiables. Les couleurs varient également fortement du roux au noir avec un petit horizon grisâtre très sec en croûte au sommet. A priori, il semble peu probable que cette succession très rapide et mélangée de tourbes différentes soit la conséquence d'une évolution propre du solum sous l'effet de conditions physico-chimiques. Nous supposons plutôt qu'elle est le résultat de nombreux remaniements de la tourbe lors des travaux avec de nombreux apports externes. Cette hypothèse est étayée par la pratique des exploitants qui utilisaient les sommets de murs décapés pour faire sécher les "briquettes" de tourbe. Les prélèvements ont été choisis sous la zone couverte du coussinet de *Polytrichum strictum*. Cinq échantillons concernent les horizons perturbés de la surface et un sixième a été récolté dans la masse principale de tourbe

Les résultats des analyses sont présentés sur le tableau 14 et le profil illustré sur la figure 40.

Caractéristiques générales

L'acidité est très forte au sommet et décroît régulièrement vers la profondeur tout en restant à une valeur caractéristique pour un haut-marais (pH de 3.6 en surface et de 5.1 en profondeur). L'humidité présente un saut important entre la petite couche grisâtre de surface et les horizons sous-jacents. En effet, l'horizon supérieur est une croûte sèche (53% d'eau) très mince et dure jouant un rôle indéniable contre l'évaporation depuis la profondeur. En profondeur, l'humidité augmente régulièrement pour atteindre 90% dans la masse principale de tourbe.

Pour le taux de fibres, tous les horizons sont qualifiés de "fibrique" avec un taux plus bas entre 12 et 20 cm dans l'horizon d'aspect pâteux. A noter que l'horizon le plus fibreux, bien que présentant une valeur encore faible (63%), n'est pas en profondeur mais dans un horizon noir proche de la surface. La masse principale de tourbe présente une valeur assez faible avec 58% de fibres. Les fractions granulométriques montrent une relative faible proportion de petites fibres en regard des grandes fibres, très bien représentées tout au long du profil, avec une augmentation jusqu'à 40% en profondeur! La fraction fine est également fortement représentée attestant l'état de dégradation général de ces tourbes.

En fait ces valeurs de texture sont à mettre en relation avec la composition botanique qui nous indique une nette différence entre les cinq horizons supérieurs et la masse de fond. Celle-ci est une

Tableau 14: Résultats pédologiques, stade 1, série des gazons de mousses

Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 1

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice pvtro	indice REG	cendres (%)	M.O. (%)
			cau	KCl		>3000 um	11-2-2 mm	50-200 um					
HI	211	0-3	3.6	2.6	53.2	nd	nd	nd	nd	28.4	nd	27.0	73.0
HI	216	3-7	3.6	2.8	74.5	22.8	7.3	40.4	52.3	18.7	2.80	12.7	87.3
HI	215	7-12	3.7	2.9	77.0	28.7	7.8	28.8	63.4	19.8	3.20	15.0	85.0
HI	214	12-20	3.9	3.3	79.5	34.2	23.1	27.9	49.0	14.7	3.33	16.4	83.6
HI	213	30-35	4.1	3.0	84.8	35.4	9.2	33.7	57.1	25.1	2.28	17.7	82.3
HI	212	60-65	5.1	3.6	90.5	39.1	1.4	40.4	58.2	23	2.53	31.0	69.0

Hor.	échant.	prof. (cm)	Eléments mobilisables							rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
			CEC (meq/100g)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Ca	Mg						
HI	211	0-3	110.8	0.09	0.08	0.06	0.06	0.06	1.10	1.67	48.7	5.87	29.1	1.44	
HI	216	3-7	100.8	0.01	0.08	0.06	0.06	0.06	0.10	3.89	51.6	6.58	13.3	1.52	
HI	215	7-12	93.7	0.05	0.08	0.05	0.05	0.06	0.60	2.28	51.6	6.13	22.7	1.42	
HI	214	12-20	68.4	0.01	0.08	0.06	0.05	0.05	0.10	4.82	51.5	6.62	10.7	1.53	
HI	213	30-35	89.5	0.02	0.08	0.03	0.08	0.08	0.30	1.36	53.9	6.11	39.6	1.35	
HI	212	60-65	79.1	0.04	0.08	0.03	0.06	0.06	0.50	2.67	53.4	6.47	20.1	1.44	

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité		densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative								
			totale (%)	macro- (%)		capacité de rét. en eau (%)	micro- (%)	sphagniques (%)	mousses (%)	herbes (%)	ligneux (%)	bois (%)	agrégaux (%)	
HI	211	0-3							0	20	5	20	15	40
HI	216	3-7	94.4	3.0	0.16	590.7	28.5	18.3	5.3	1.8	77.4	2.8	0.7	11.9
HI	215	7-12							2.8	7.1	40.1	2.3	1.2	46.5
HI	214	12-20							8.4	9.0	38.0	20.7	6.0	17.9
HI	213	30-35	95.0	3.7	0.14	681.2	34.1	49.0	26.3	2.3	16.5	1.2	4.7	
HI	212	60-65												

Proportions estimées et non calculées. Explications dans le texte

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

tourbe à sphaignes à raison de 50% avec des structures herbacées et des éléments ligneux linéaires, ce qui explique la proportion de grandes fibres. Pour les autres couches, un seul horizon possède des restes de sphaignes. La présence de grandes fibres est corrélée à celle des racines ligneuses et des grandes gaines herbacées. L'horizon pâteux, le moins fibrique, a une proportion importante de grands agrégats, avec des grandes gaines herbacées.

La croûte supérieure n'a pas permis une détermination des fractions car cette tourbe présente une structure coalescente non mouillable, même après une agitation de 48h avec des billes. L'observation à la loupe binoculaire pour la détermination des macrorestes nous a montré un amas de gros agrégats et de morceaux de bois enrobés dans une masse mycélienne et alguesque extrêmement solide. Seule une estimation des proportions des constituants a été possible. WICKY (1988) signale la présence d'une croûte d'algues jaunes (*Heterotrix ulotricioides*, Xanthophyceae), très mince sur la tourbe mise à nu. Nous avons observé ces pellicules d'algues "à l'allure de bouses de vache" sur certains sites mais elles n'ont rien à voir avec la transformation de la tourbe sur 3 à 4 cm de profondeur par un dense réseau de filaments mycéliens collants et hydrofuges.

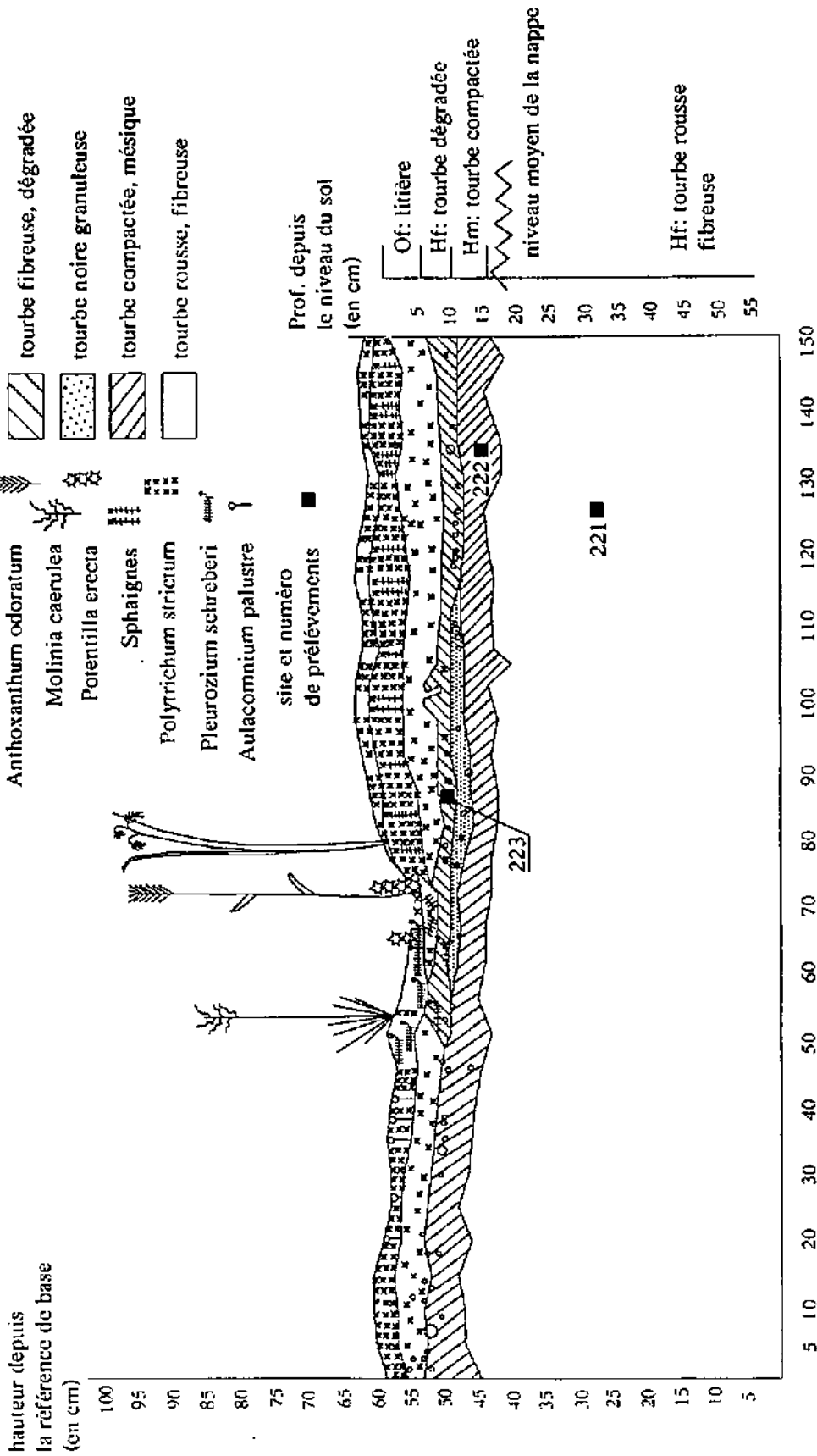
L'indice pyro est moyennement élevé et assez régulier avec des valeurs autour de 20 avec une valeur plus élevée à 28 pour la croûte de surface. En profondeur, le degré de décomposition est le même que pour les horizons supérieurs attestant l'influence du drainage important jusqu'en profondeur par l'effet du mur.

Le taux de cendres est en corrélation avec l'indice pyro et atteste clairement le caractère cendreux de la croûte de surface par rapport aux horizons inférieurs. A noter que l'horizon profond présente également un haut taux de cendres avec 31%, ce qui peut dénoter des mouvements de lixiviation depuis les couches remaniées de surface et accumulation dans la partie sommitale de la masse en place.

Du point de vue chimique, ce solum se caractérise par une importante lixiviation du calcium, mesuré en très petite quantité sur tout le profil. Le magnésium est constant et peu présent alors que le potassium et le sodium sont en quantité comparable avec les autres sols. Une légère diminution du potassium est notée en profondeur. Cette importante lixiviation se traduit par une CEC très affaiblie pour des tourbes présentant un indice pyro et un taux de cendres aussi élevés. Ces valeurs apparemment contradictoires peuvent s'expliquer par la nature des produits de dégradation émis par ces tourbes soumises à des battements de nappes importants et à des oxydations en profondeur. Ainsi, il est fort probable que la valeur donnée par l'extraction au pyrophosphate de sodium soit influencée par la présence d'une forte proportion d'humine résiduelle (HR), produite par un fonctionnement du solum apparenté à un mor. Cette qualité d'humine, produit de résidus peu transformés, ne participe pas fortement au complexe d'échange si bien que la CEC mesurée reste faible attestant le lessivage des cations principaux et la faible présence de complexes d'échanges cationiques. L'analyse du rapport atomique H/C présenté au chap. 4.4.4. permet de confirmer cette hypothèse, par la nature fortement aromatique des composés constitutifs de la tourbe, ce qui correspond bien aux caractéristiques de l'humine (RAFIDISON, 1982)

Dans le même ordre d'idée, le rapport C/N est très bas pour un HISTOSOL, ce qui indique encore une fois la faible capacité d'intégration de la matière organique et la forte lixiviation des éléments par le drainage rapide des eaux de pluie.

Profil pédologique
Série des gazons de mousses, stade 2,
Le Cachot



Le degré de compaction du sol reste moyen par la présence de grosses structures herbacées et d'éléments linéaires assez longs et ligneux. Les mesures de densité faites entre 7 et 12 cm et en profondeur indiquent des valeurs moyennes, comparables aux buttes à *Eriophorum* ou aux échantillons de profondeur de La Chaux-d'Abel. La capacité de rétention en eau est un peu plus faible en surface mais indique clairement une baisse importante de cette caractéristique par rapport au sol des Pontins, et ce jusqu'en profondeur. Les valeurs sont les mêmes que pour les horizons de La Chaux-d'Abel, où la tourbe est fortement dégradée. Du point de vue de la porosité, si la valeur totale est élevée, les valeurs pour la macroporosité sont très faibles. Ce fait est intéressant et indique clairement que l'arrangement interne du matériau constitutif est fondamental quant aux capacités d'écoulement, et qu'il ne suffit pas d'avoir de grandes fibres en quantité pour garantir un fort écoulement de l'eau. Ici, l'orientation des grandes gaine herbacées est régulièrement horizontale provoquant une faible porosité effective et une importante porosité résiduelle, conséquence de la présence de nombreux pores occlus. La mésoporosité moyenne est également assez faible ce qui est moins surprenant vu la faible proportion de la fraction granulométrique de 50 à 200 μm .

Ainsi, l'eau de pluie s'écoule plus facilement latéralement en surface, d'où l'érosion constatée, mais également en profondeur, exportant vers le bord du mur la majorité de l'eau qui parvient à descendre dans le profil ou qui s'écoule activement depuis l'arrière, en relation directe avec la nappe de la masse de tourbe qui forme le haut-marais en prolongement de notre station. Lorsque celle-ci est mise en charge par des pluies importantes, l'appel physique induit par le mur provoque cette mise en mouvement latéral, favorisé par l'orientation des structures herbacées formant les horizons sur toute la profondeur. La vitesse de ces mouvements et l'importance de l'effet drainant du mur ne permettent pas un engorgement permettant de mesurer une nappe phréatique.

Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE hérité, oligotrophe, ombrogène
--

Tableau 15: Résultats pédologiques, stade 2, série des gazons de mousses

Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 2

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice pyro	indice REG	cendres (%)	M.O. (%)
			eau	KCl		>2000 um	0.2-2 mm	50-200 um					
Hf	223	5-10	4.3	3.6	86.5	12.1	62.2	9.0	16.7	24.1	3.08	8.6	91.4
Hm	222	10-15	4.9	3.5	79.5	1.9	24.5	21.8	51.8	40.2	0.66	31.6	68.4
Hf	221	40-45	5.5	4.8	90.9	13.8	47.6	24.8	13.8	12.2	5.03	14.0	86.0

Hor.	échant.	prof. (cm)	Éléments mobilisables							rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
			CFC (mg/100g)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)								
Hf	223	5-10	120.7	0.26	0.10	0.10	0.07	0.07	2.70	2.53	44.8	6.28	17.7	1.67	
Hm	222	10-15	104.2	0.05	0.14	0.12	0.08	0.08	0.40	3.05	43.8	5.56	14.3	1.51	
Hf	221	40-45	108.5	0.47	0.08	0.03	0.08	0.08	5.90	1.90	48.9	6.12	25.7	1.49	

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité		capacité de rét. en eau		densité apparente (g/cm3)	composition botanique relative					
			totale (%)	macro (%)	micro (%)	rt. en eau (%)		sphaériques (%)	mousses (%)	herbes (%)	ligneux (%)	bois (%)	agrégats (%)
Hf	223	5-10	91.9	5.3	27.3	507.0	0.19	27.9	27.4	22.6	9.9	2.0	10.3
Hm	222	10-15	94.6	4.4	32.7	726.3	0.13	1.1	5.1	18.4	7.6	2.8	65.0
Hf	221	40-45						59.8	2.0	7.5	2.2	0.0	28.5

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

4.2.4.6. Série des gazons de mousses, stade 2, Le Cachot

Contrairement au premier stade de la série, le solum du Cachot présente pour le stade 2 une stratification horizontale très nette avec une différenciation marquée et horizontale entre la partie supérieure du profil, ayant évoluée fortement depuis la mise à nu du terrain en 1925 (W. MATTHEY, *comm. pers.*).

Au Cachot une vaste surface a été décapée, sans une élimination de tourbe importante. Un long front d'exploitation borde cette surface parallèlement à la lisière artificielle de la surface primaire du haut-marais. Le drainage par le mur était complété par un drainage superficiel favorisé par quelques rigoles creusées dans la masse de tourbe. Celles-ci ont été neutralisées depuis de nombreuses années par des barrages. Ces travaux ont, à l'évidence, permis d'accélérer la régénération par le maintien d'une plus grande quantité d'eau en surface, et ce avec un gradient d'efficacité décroissant de la zone primaire (réservoir biologique et hydrique) vers le bord du mur. Nos trois stades expriment ce gradient évolutif du mur vers l'intérieur du marais.

Ainsi, le stade 2, relativement proche du mur, présente actuellement une dense couverture de *Polytrichum strictum*, dans le tapis duquel on localise quelques sphaignes par têtes isolées. La végétation herbacée est rare et dispersée. Quelques *Pinus mugo* et *Betula pubescens* marquent le paysage général. Le profil présente en surface une litière de Polytrics sur 5 cm d'épaisseur environ. Un horizon peu épais (2 à 3 cm), fragmentaire, noir, composé d'un mélange de litière de Polytrics, de sphaignes et de matière organique fine humifiée fibreuse à grumeleuse prend place sous la litière. Comme le montre parfaitement le profil illustré sur la figure 41, l'épaisseur et le dynamisme du tapis de Polytrics ainsi que la présence des sphaignes dans ce tapis sont liés à la présence de cet horizon, marquant certainement un degré d'évolution plus grand et une colonisation plus avancée dans cette zone qu'à côté, où le tapis de Polytrics est encore assez mince. C'est au niveau de cette couche que se fait l'enracinement préférentiel des éricacées et des herbacées qui parviennent horizontalement jusqu'à ce secteur. Sous cet horizon, nous différencions un horizon de dégradation noir pâteux collant à légèrement grumeleux au toucher, composé d'éléments fins non reconnaissables, d'une épaisseur de 5 cm environ. L'horizon supérieur, avec le tapis muscinal et les racines, se décolle de ce dernier en une masse structurée, sur lequel il est posé sans réelle intégration. Le plancher inférieur est net et légèrement bosselé. Il fait la transition avec la masse principale de tourbe brune-rouge, très fibreuse, montrant des restes de sphaignes. Vu son épaisseur, le profil n'en illustre que sa partie supérieure, bien au-dessus du substrat minéral. Quelques gros morceaux de bois apparaissent au bas du profil.

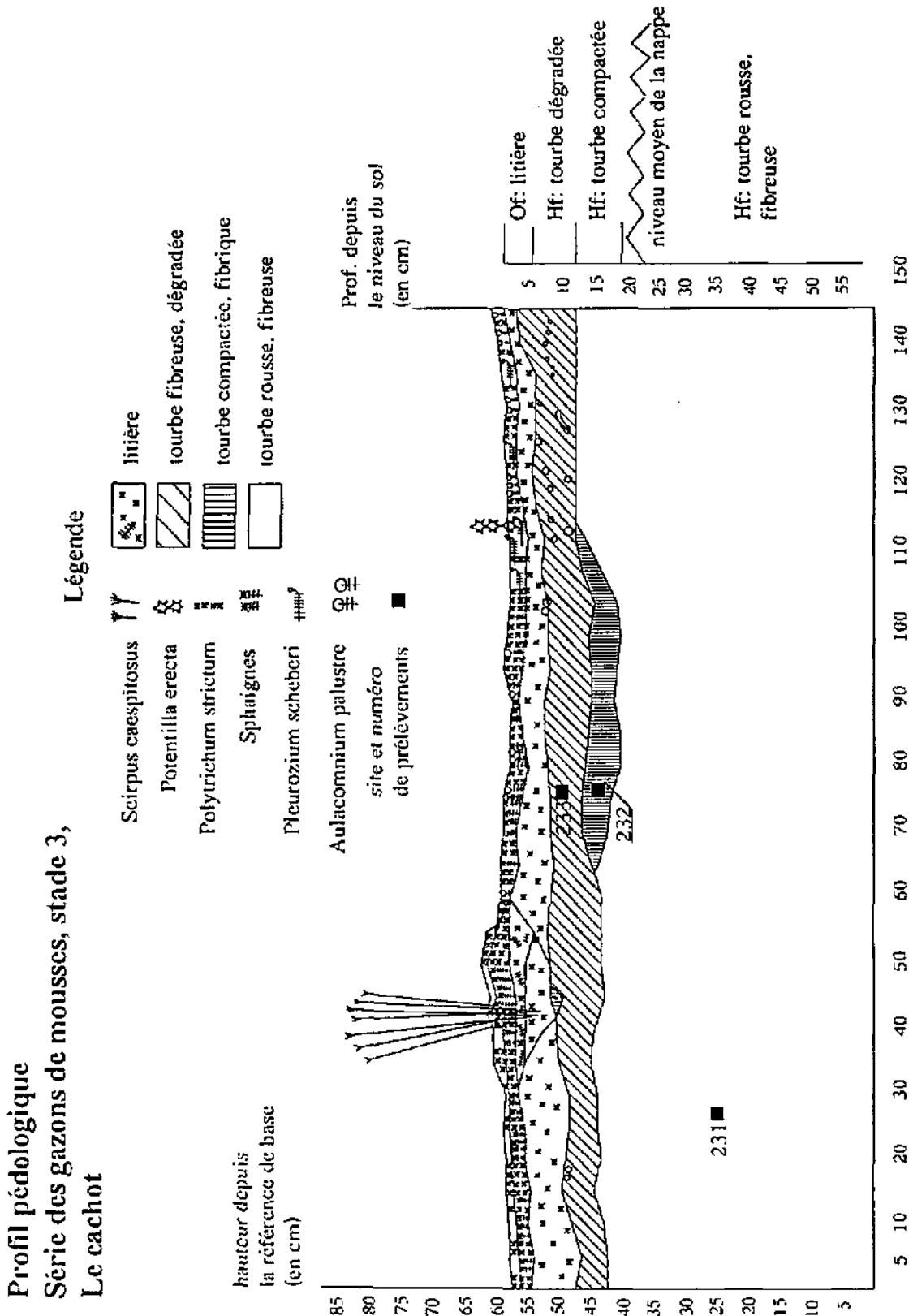
Un niveau de saturation hydrique à fortes fluctuations imbibe le profil sans jamais inonder la couche de Polytrics. Il est difficile à caractériser vu la différence de comportement mise en évidence entre sa partie supérieure et le fond.

Le tableau 15 présente les résultats des analyses effectuées sur trois échantillons, en fonction de chaque horizon décrit.

Caractéristiques générales

Pour tous les paramètres mesurés une forte différence est mise en évidence entre l'horizon noir-pâteux et ses deux voisins. Seul le pH indique une diminution régulière de l'acidité de la surface vers la profondeur, ce qui confirme une fois encore le rôle acidifiant des mousses caractéristiques des hauts-marais.

Figure 42: Profil pédologique, stade 3, série des gazons de mousses



Sinon, cet horizon est nettement plus sec, mésique, avec un indice pyro 2 fois plus haut qu'en surface et 3.3 fois plus haut qu'en profondeur. Le taux de cendres est également nettement plus élevé (4 et 2.2 fois). Chimiquement, il présente les caractéristiques mises en évidence pour les horizons du premier stade avec une baisse nette de la concentration en calcium. Ici par contre, il y a une augmentation du magnésium et du potassium. Son rapport C/N est également faible. Comme pour le stade 1, la CEC n'est pas corrélée à la décomposition mise en évidence par l'indice pyro. Les mêmes hypothèses s'appliquent ici. Sa composition botanique confirme parfaitement le faible taux de fibres, composé principalement de gros agrégats, avec quelques racines d'herbacés et de ligneux.

L'horizon supérieur est très jeune avec un rapport C/N encore bas et un taux de cendres faible. Son indice pyro est par contre assez haut, influencé par sa fraction fine. Il a une assez bonne concentration de calcium, bien que celui-ci s'accumule principalement dans l'horizon profond.

Au niveau des degrés de compaction et des porosités, nous avons mesuré l'horizon pâteux et la tourbe de fond. La densité apparente est élevée et, corollairement, la capacité de rétention en eau faible à très faible pour une tourbe. En profondeur, les valeurs reflètent une amélioration assez nette. La macroporosité est basse pour les deux horizons. Il y a amélioration de la mésoporosité moyenne vers la profondeur alors qu'elle présente une valeur parmi les plus faibles pour l'horizon dégradé.

Ce profil illustre parfaitement le phénomène de dégradation mis en évidence par SCHNEEBELI (1991). Il compare l'évolution de la capacité de conduction de l'eau (Leitfähigkeit) pour un sol non producteur de tourbe après une atteinte humaine (sol qualifié de Desaquist par opposition à un Crescaquist) en montrant l'augmentation du degré de décomposition suite à l'abaissement du niveau de la nappe et à la compaction de la tourbe. Il estime ainsi que le comportement du potentiel hydraulique d'un Desaquist est comparable à celui d'un pseudogley. Il y a donc bien imperméabilisation par la tourbe dégradée, et création de petites nappes perchées temporaires en fonction de la microtopographie du terrain. Vu l'épaisseur des horizons concernés, la mise en évidence de ces nappes par des mesures directes pose d'évidents problèmes matériels.

Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE rajeuni, ombrogène, à horizon mésique peu épais et nappe perchée temporaire

Tableau 16: Résultats pédologiques, stade 3, série des gazons de mousses

Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 3

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice		cendres (%)	M.O. (%)	
			eau	KCl		>2000 um	0.2-2 mm	50-200 um		0-50 um	pyro		REG	
Hf	233	5-10	4.3	3.5	88.1	22.3	31.1	27.7	18.9	53.3	12.2	4.37	19.4	80.6
Hf	232	15-28	5.1	4.1	78.7	6.0	55.9	23.3	14.8	61.9	22.3	2.78	35.7	64.3
Hf	231	40-45	5.5	4.8	88.6	11.3	58.0	15.1	15.6	69.3	10.5	6.60	23.0	77.0

Eléments mobilisables																
Hor.	échant.	prof. (cm)	CEC *6q/100g	Ca (%)		Mg (%)		K (%)		Na (%)	rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
				Ca	Mg	K	Na									
Hf	233	5-10	134.9	0.30	0.10	0.12	0.07	2.90	3.04	46.5	5.76	15.3	1.44			
Hf	232	15-28	107.2	0.37	0.09	0.06	0.07	4.30	2.92	45.7	5.53	15.7	1.63			
Hf	231	40-45	117.9	0.53	0.09	0.03	0.07	6.00	1.88	49.3	5.76	26.2	1.49			

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité			densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative					
			total (%)	macro- (%)	méso- (%)		capacité de rét. en eau (%)	sphaignes (%)	mousses (%)	herbes (%)	liigneux (%)	bois (%)
Hf	233	5-10	93.2	3.8	28.9	0.20	26.8	21.3	29.7	6.0	1.8	14.5
Hf	232	15-28	96.0	5.5	33.3	0.13	3.4	0.8	23.3	1.3	4.0	67.2
Hf	231	40-45					48.3	4.1	33.5	0.7	1.1	12.3

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

4.2.4.7. Série des gazons de mousses, stade 3, Le Cachot

Le profil pédologique du stade 3 présente une image parfaitement similaire à celle du stade 2. Nous mettons à nouveau en évidence le feutrage de litière de *Polytrichum strictum* avec une plus forte proportion de restes de sphaignes. Au niveau des structures vivantes, Polytrics et sphaignes se partagent bien le tapis avec de nombreux petits secteurs où les sphaignes dominent et commencent à former des peuplements purs.

Ainsi, l'horizon racinaire noir, fibreux et grumeleux lié aux sphaignes au stade 2 est bien présent ici sur tout le profil. Il forme une strate assimilable à un horizon déjà bien différencié, continu et épais de 5 à 8 cm. Comme pour le stade précédent, il est posé sur l'horizon inférieur sans intime relation et se décolle comme une moquette à la hauteur de sa base en laissant apparaître un plaquage lisse et brillant. Immédiatement dessous, l'horizon d'altération est nettement plus diffus. Il se marque bien du point de vue de la couleur et de la structure sur de petites zones intégrées à la masse principale. Ces zones sont grises à brunes, collantes et pâteuses alors que la masse de tourbe principale, identique à celle du profil précédent, est rousse et bien fibreuse. L'horizon de dégradation apparaît donc ici comme issu de la masse tourbeuse initiale.

Les résultats sont rassemblés au tableau 16 et le profil dessiné sur la figure 42.

Caractéristiques générales

Les résultats d'analyses confirment la similitude entre les deux stades. Etant plus intégré à la masse de tourbe, l'horizon dégradé présente des valeurs moins marquées pour certains paramètres, avec un taux de fibres nettement plus haut et un indice pyro moins élevé. Au contraire le taux de cendres est plus élevé.

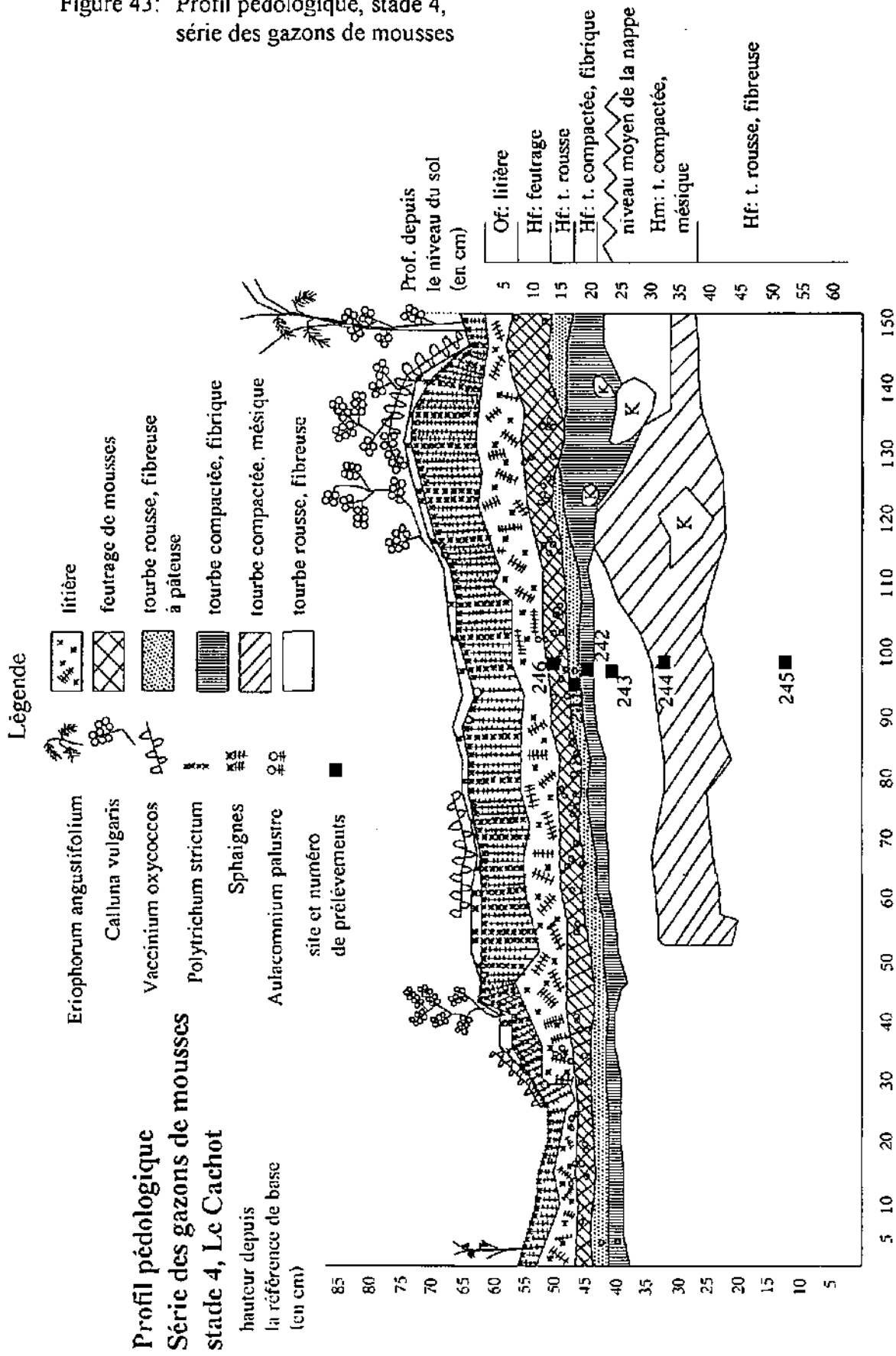
Chimiquement, la lixiviation du calcium n'est plus mise en évidence. Ce fait confirme l'hypothèse émise pour la série des touradons quant à la relation entre cet élément et la couverture de sphaignes en surface. Le magnésium est complémentaire quant à sa réaction puisqu'il présente ici une valeur faible constante.

La caractéristique principale de cet horizon est donnée par la capacité de rétention en eau et la densité qui donnent des valeurs extrêmes, tout comme les macro- et mésoporosités moyennes. L'horizon profond présente exactement les mêmes valeurs que celui du stade précédent.

Diagnostic

HISTOSOL FIBRIQUE, rajeuni, ombrogène, à nappe perchée temporaire.
--

Figure 43: Profil pédologique, stade 4, série des gazons de mousses



4.2.4.8. Série des gazons de mousses, stade 4, Le Cachot

Le stade 4 présente un solum plus perturbé, avec de gros restes de bois non décomposés, entourés de loupes de dégradation. Hors de ces "accidents" locaux, le profil montre la même nature que les précédents. Ici, la nappe préatique est nettement plus constante et plus haute, favorisant la croissance des sphaignes, qui commencent à différencier nettement des petites buttes. Une litière de sphaignes jeunes fait la transition entre la partie vivante des mousses et l'ancien feutrage de *Polytrichum strictum*, noir et grumeleux avec de nombreuses racines et radicelles, littéralement "fossilisé" sous le tapis de sphaignes. **Il est la relique de l'état passé et a été submergé par l'inversion des proportions Polytrics-sphaignes au niveau des plantes vivantes.** Sous ces couches de litière, un très mince horizon de dégradation (et d'accumulation?) peut être différencié sur 2 à 3 cm d'épaisseur. Il est brun-roux fibreux avec de nombreux restes de sphaignes reconnaissables. Au-dessous, l'horizon de dégradation est mince également (2 à 3 cm), noir et pâteux. Comme au stade 3, sa base inférieure est structurée en plaques horizontales luisantes. Il est posé sur une tourbe rousse pâteuse, légèrement fibreuse, appartenant à la masse tourbeuse principale du haut-marais. Cet horizon est veiné de loupes de décomposition en relation avec les grosses racines mises à jour. Autour de ces bois, la tourbe est brune grumeleuse avec de nombreuses fibres et radicelles. Comme le montre la figure 43, les prélèvements pour analyses ont été effectués dans le feutrage de polytrics, le plus précisément possible dans chaque horizon très mince. De plus, nous avons différencié la tourbe dégradée autour du bois principal et la masse principale au-dessus et au-dessous de cette veine plus décomposée.

Les résultats sont présentés au tableau 17 et à la figure 43.

Caractéristiques générales

Le tapis de mousses et les couches de litières montrent une nette acidification, y compris l'horizon mince de dégradation. Le taux d'humidité est partout élevé attestant la présence plus constante de la nappe et le rôle important du tapis épais de sphaignes face à la mince épaisseur de l'horizon de dégradation. Celui-ci doit être considéré comme mésique avec un taux de fibres abaissé à 38%. Son indice pyro est nettement plus élevé que pour les autres horizons. La veine autour du bois présente également une tourbe mésique malgré la présence d'une haute fraction $> 2000 \mu\text{m}$ en relation avec les radicelles. A noter que l'horizon mince supérieur est très fibreux. Sa composition botanique montre une très forte proportion de sphaignes dont les feuilles sont entières et encore "jeunes". Face à ce petit horizon, nous formulons l'hypothèse d'un **entraînement des feuilles de sphaignes par les mouvement verticaux de la nappe depuis la litière sphagnale à travers le feutrage de Polytrics.** Ce phénomène apparaît d'autant plus possible si l'on analyse les valeurs de la porosité et de la densité de ce feutrage. En effet, la macroporosité ($> 200 \mu\text{m}$) y est particulièrement importante (37%) avec une densité extrêmement faible. Ces valeurs attestent d'un passage possible au travers du feutrage pour des feuilles de sphaignes.

Le mince horizon de dégradation a des valeurs de densité assez faibles et une porosité moyenne. Il est délicat ici, malgré une moyenne de trois mesures, d'attribuer ces chiffres à une cause liée à l'évolution pédologique ou à la difficulté de prélever un échantillon pur. En effet, le cylindre de prélèvement fait 5 cm de hauteur et l'horizon seulement 2 à 3 cm. La variabilité des mesures est un peu plus grande que pour les autres prélèvements au niveau des porosités mais aucun échantillon ne donne des valeurs aussi basses que pour les deux autres stades. Pédologiquement, comme le suggère SCHNEEBELI (1991), il est envisageable que la conductivité hydraulique augmente à nouveau dans cet horizon par le rôle des structures vivantes régénérées au-dessus et par l'augmenta-

Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 4

Tableau 17: Résultats pédologiques, stade 4, série des gazons de mousses

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice		M.O. (%)		
			eau	KCl		>2000 µm	0.2-2 mm	50-200 µm		0-50 µm	REG		pyro	cendres (%)
Hf	246	10-15	4.3	3.0	86.7	11.3	40.5	25.1	23.1	51.8	37.5	1.38	20.0	80.0
Hf	241	15-20	4.0	3.1	89.1	16.6	51.9	20.3	11.2	68.5	21.7	3.16	25.8	74.2
Hf	242	20-23	4.2	3.4	84.3	5.7	32.5	39.5	22.3	38.1	44.2	0.86	32.1	67.9
Hm	243	25-30	5.3	4.0	87.4	9.2	43.0	32.3	15.5	52.2	1.8	2.90	31.8	68.2
Hm	244	35-40	5.5	4.3	85.1	11.8	24.9	19.0	44.3	36.6	21.8	1.68	34.5	65.5
Hf	245	50-55	5.6	4.6	92.6	9.8	40.6	29.6	20.1	50.3	12.1	4.16	26.4	73.6

Hor.	échant.	prof. (cm)	Eléments mobilisables										rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
			CEC (meq/100g)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)											
Hf	246	10-15	123.8	0.26	0.11	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	2.30	1.48	44.2	5.39	29.9	1.45
Hf	241	15-20	93.8	0.12	0.09	0.09	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	1.30	2.30	46.8	6.41	20.3	1.63	
Hf	242	20-23	93.7	0.12	0.08	0.11	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	1.50	2.68	48.1	6.00	18.0	1.49	
Hm	243	25-30	125.3	0.46	0.09	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	5.00	2.71	47.4	5.67	17.5	1.43	
Hm	244	35-40	152.6	1.61	0.10	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	2.14	15.90	48.6	5.92	22.8	1.45		
Hf	245	50-55	132.2	0.48	0.11	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	1.71	4.40	49.2	5.06	28.9	1.22		

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité			densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative						
			totale (%)	macro (%)	méso (%)		capacité de rét. en eau (%)	sphaignes (%)	mousses (%)	herbes (%)	bois (%)	agrégats (%)	
Hf	246	10-15	81.7	36.9	51.1	996.5	0.08	2.0	56.8	28.9	5.9	3.9	2.5
Hf	241	15-20	94.5	9.1	31.2	783.1	0.12	67.3	3.7	10.6	2.6	0.4	15.5
Hf	242	20-23	94.5	9.1	31.2	783.1	0.12	0.8	1.2	40.6	1.6	0.8	55.1
Hm	243	25-30	93.1	3.9	33.2	720.6	0.13	0.6	4.1	65.4	10.4	8.1	11.5
Hm	244	35-40	93.1	3.9	33.2	720.6	0.13	1.2	4.2	49.0	20.2	16.9	8.5
Hf	245	50-55	93.1	3.9	33.2	720.6	0.13	45.7	0.9	33.3	12.3	4.5	3.2

Le rapport ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

tion de la teneur en eau en relation avec la nappe phréatique. Ces valeurs appuyent encore l'hypothèse des mouvements descendants des feuilles de sphaignes par un meilleur battement potentiel de la nappe.

Dans ce profil, le taux de cendres est partout assez élevé.

Chimiquement, les deux horizons minces présentent une faible concentration en calcium et une CEC nettement plus basse. Le calcium s'accumule légèrement au niveau du feutrage de Polytrics et très fortement dans la veine dégradée (1.61%). Ces chiffres contredisent la notion d'accumulation de calcium dans les parties basses des sphaignes vivantes formulée par MALMER (1988), à moins que la comparaison avec des feuilles détachées ne soit pas réellement possible.

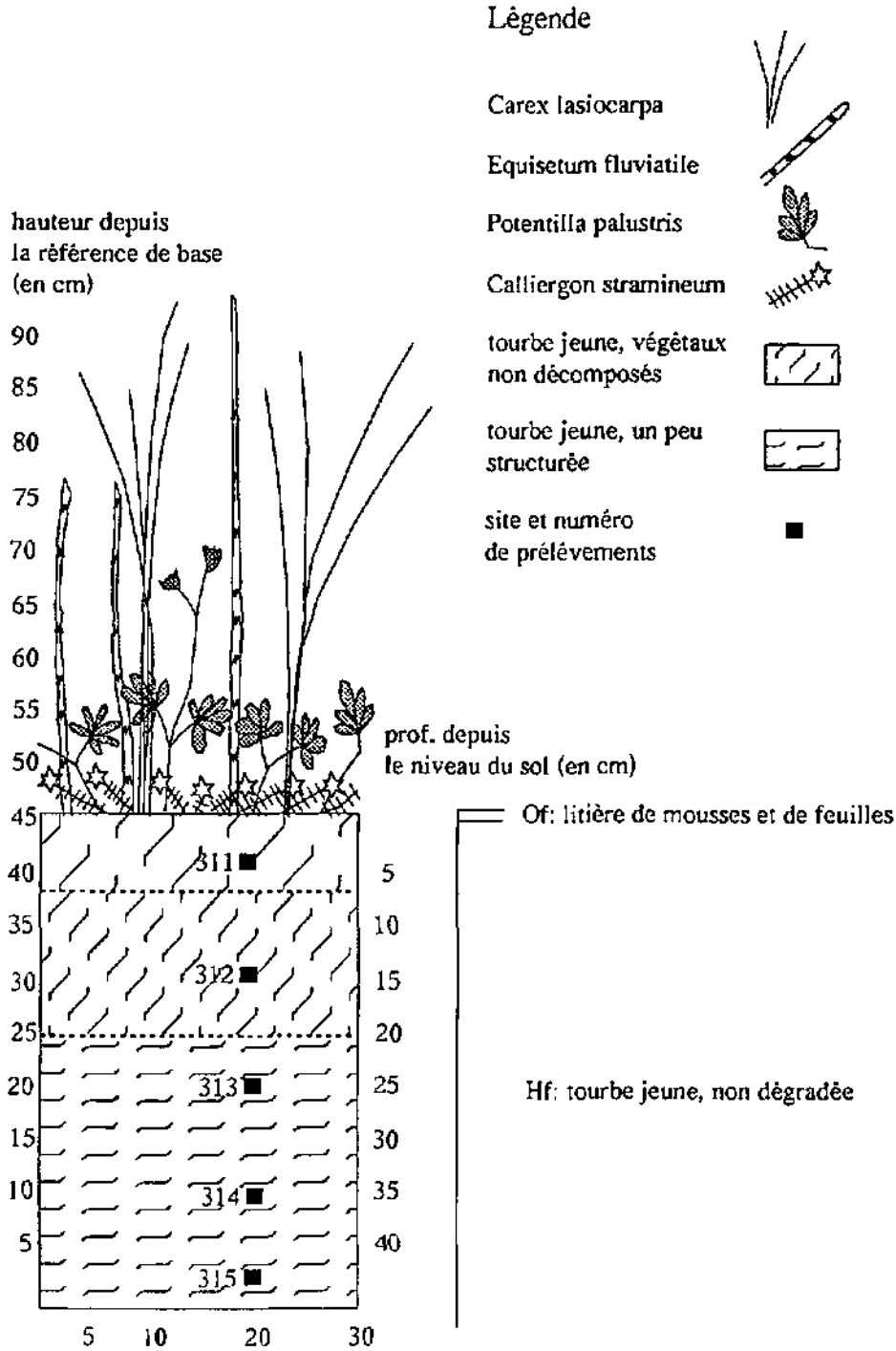
Le rapport C/N est faible.

Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE rajeuni, ombrogène, à horizons mésiques peu épais

Figure 44: Profil pédologique, stade 1, série des marais tremblants

Profil pédologique
Série des marais tremblants, stade 1, Belleclay



4.2.4.9. Série des marais tremblants, stade 1, Bellelay

Le premier stade décrit dans les fosses de Bellelay est nettement dépendant du niveau hydrique. Le sol est très jeune, continuellement gorgé d'eau et subit des fluctuations d'épaisseurs en relation avec les mouvements de la nappe phréatique. Comme déjà indiqué, il est impossible de creuser une tranchée structurée pour la description, qui a ainsi été faite après un carottage au moyen d'une tarière de 14 cm de diamètre, spécialement élaborée pour des expériences parallèles à notre projet (GROSVERNIER, 1996). Le solum se distingue par une grande homogénéité et une tourbification faible mais régulière des mousses, sphaignes et herbes qui ne forment pas d'horizons bien marqués. Seul un petit horizon est définissable en surface entre 0 et 7 cm. Il est formé d'un "radeaux" de rhizomes de *Potentilla palustris*. Celui-ci est "posé" sur une tourbe blonde à sphaignes (*Sphagnum angustifolium*) et autres mousses du genre *Drepanocladus* et *Calliergon*, formant un "horizon" diffus avec la tourbe à sphaignes blonde et lâche qui le prolonge vers le bas. Sur le sol lui-même, une très petite couche de litière de mousses, mélangée à des feuilles de bouleau en décomposition se marque par une couleur noirâtre. Elle est elle-même partiellement immergée. Le carottage ne concerne que les 60 premiers centimètres du sol et n'atteint pas l'ancienne tourbe. Nous avons prélevé 5 échantillons en différenciant les horizons supérieurs puis en prélevant régulièrement tous les 10 cm environ. La litière décrite n'a pas été analysée.

Le profil est illustré sur la figure 44 et les résultats d'analyses rassemblés sur le tableau 18.

Caractéristiques générales

La tourbe de Bellelay se forme sous l'influence directe d'une eau en mouvement lent mais imposé par une légère pente du substrat imperméable et de la couche de tourbe elle-même (NATURA, 1988). Cette eau coule depuis les terrains calcaires amont (pâturages boisé puis forêt de pente) et impose des conditions soligènes et minérotrophes pour les secteurs les plus inondés. Ainsi, l'acidité est très faible (entre pH 6 et 6.5) sur tout le profil. Nous avons tout de même mesuré une valeur de pH 4 en prélevant l'eau libre de surface, ce qui peut déjà dénoter une acidification du milieu par les mousses et les sphaignes.

Ces valeurs de pH élevées démontrent une fois encore (GOBAT *et al.* 1986) que l'acidité n'est pas un facteur écologique fondamental pour la régénération.

Les valeurs du taux de fibres reflètent parfaitement une tourbe très jeune alors que l'indice pyro montre une valeur moyennement élevée pour ce genre de milieu (11 à 15). Cette valeur est éventuellement à mettre en relation avec la qualité de l'eau qui s'écoule à travers la masse de tourbe. Le taux de cendres est bas avec une petite augmentation entre 20 et 30 cm, au niveau d'une concentration de rhizomes.

La CEC est très faible, avec des valeurs corrélée au taux de cendres. La concentration en calcium est assez haute, en moyenne plus haute que pour les sols des séries terrestres, sans grande variation le long du profil. Le potassium ou le sodium ne montrent pas une concentration plus grande alors que le magnésium est très légèrement plus concentré. Au niveau du profil on note une concentration du potassium et de sodium dans l'horizon de surface

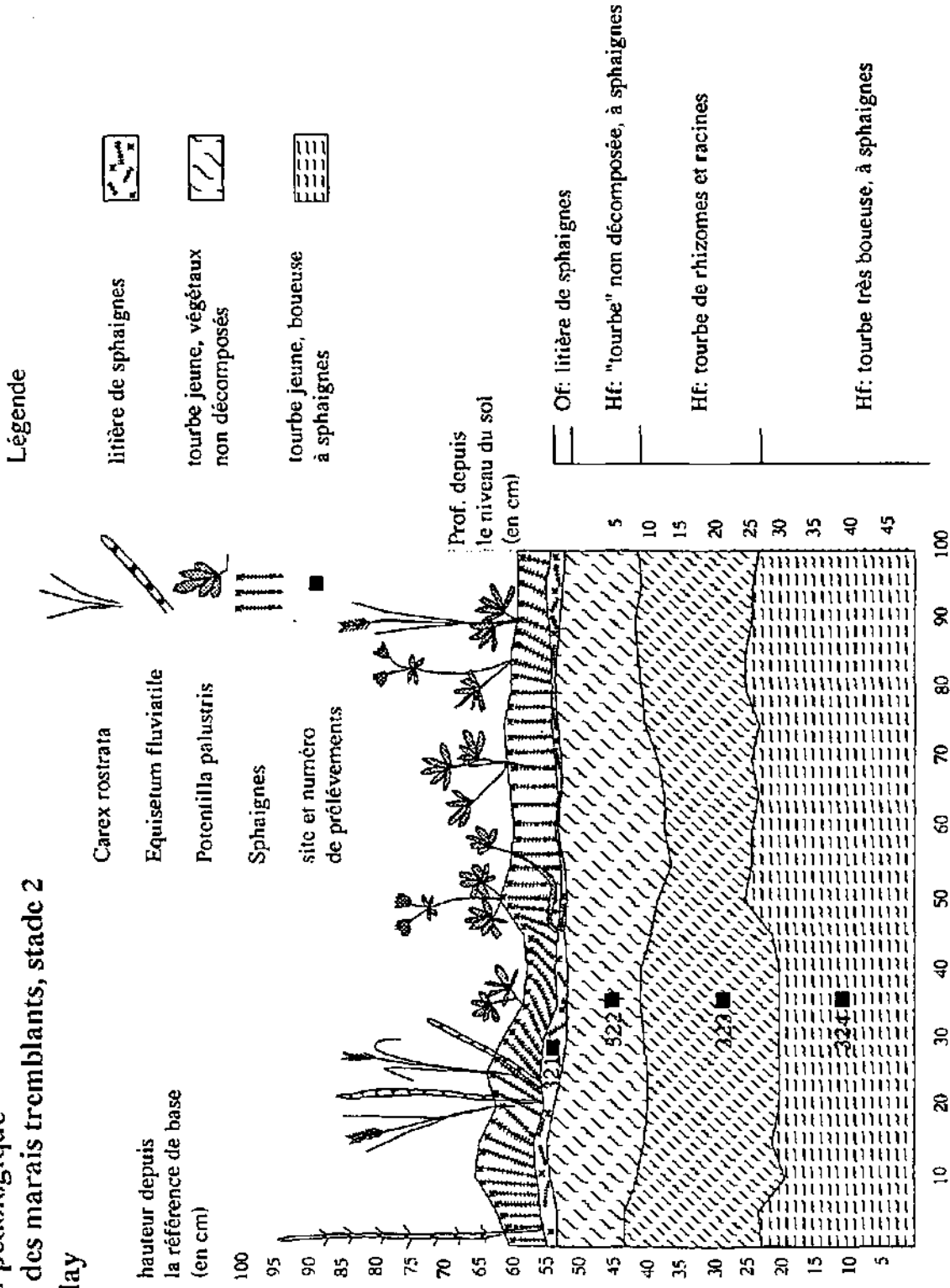
Le rapport C/N reste assez bas et augmente avec la profondeur et la tourbification. En fait, c'est principalement l'azote qui est en relativement grande quantité en comparaison avec les autres stades.

Du point de vue botanique, ce sol est constitué de tourbe à sphaignes avec une augmentation de la proportion des autres mousses en surface et des herbacés en profondeur, mais sans en modifier la caractéristique générale.

Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE rajeuni, soligène, mésotrophe, à nappe permanente

Profil pédologique
Série des marais tremblants, stade 2
Bellelay



4.2.4.10. Série des marais tremblants, stade 2, Bellelay

Le deuxième stade est localisé dans la même fosse que le précédent. Les sphaignes (*Sphagnum angustifolium*) sont nettement plus couvrantes et forment un véritable tapis compact et continu dans lequel se développent *Potentilla palustris*, *Equisetum fluviatile* et *Carex lasiocarpa*. Du point de vue pédologique, ce stade est très proche du précédent avec, sous la couverture de sphaignes vivantes, une petite zone de litière compactée puis un horizon de tourbe jeune, blonde dans lequel on met bien en évidence le mode de croissance des sphaignes avec leur affaissement latéral à chaque fin de période de végétation. Son épaisseur est de 15 cm environ. Il fait place à l'horizon d'enracinement principal de la végétation avec un entrelas de rhizomes et de racines. Les sphaignes dominent néanmoins nettement. Sous cet horizon racinaire commence une importante couche de tourbe boueuse, totalement gorgée d'eau et déjà plus évoluée.

Quatre échantillons ont été prélevés, entre la litière à sphaigne et la tourbe boueuse du fond. Les résultats sont présentés au tableau 19 et le profil dessiné en détail sur la figure 45.

Caractéristiques générales

En surface, sous l'influence du tapis de sphaignes, l'acidité est déjà plus importante qu'au stade I (pH de 5.2). Elle décroît très régulièrement avec la profondeur pour atteindre un pH de 6 à 40 cm de profondeur.

Les deux horizons du fond, bien que fibreux, ont des valeurs plus basses que la surface et un indice pyro déjà nettement plus élevé. Ainsi, on passe d'un indice de 6.3 et 8.3 pour les horizons à sphaignes de surface à 12.8 et 24 vers le fond. **L'hypothèse de la relation "indice pyro - qualité des eaux d'écoulement"** (corrélée à la valeur du pH) émise au premier stade est **confirmée ici** puisque l'horizon profond est continuellement en contact avec cette eau alors que les sphaignes qui croissent en surface commencent à marquer une élévation par rapport au plan d'eau permanent. Le taux de cendres est en moyenne plus faible qu'au premier stade, mais surtout par une nette carence au niveau des horizons supérieurs.

Chimiquement, l'azote est nettement concentré dans ce profil ce qui se traduit par une augmentation notable du rapport C/N, et ce, surtout en surface dans le tapis de sphaignes. Le calcium et le magnésium présentent des valeurs similaires au stade précédent alors que l'on peut mettre en évidence une concentration du potassium dans la litière de sphaignes. Comme au stade I, les taux de sodium et de potassium sont eux aussi plus haut dans l'horizon supérieur. La CEC n'est ici pas du tout corrélée au taux de cendres et elle montre des valeurs plus hautes, surtout dans le deuxième horizon. Ces valeurs ne sont pas non plus en relation avec l'indice pyro. Peut-on évoquer la même cause qu'en milieu terrestre, par la libération principalement d'humine résiduelle, ou faut-il chercher une autre explication?

Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE, rajeuni, soligène, mésotrophe

Résultats des analyses de sol, série des marais tremblants, stade 2

Tableau 19: Résultats pédologiques, stade 2, série des marais tremblants

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice		cendres (%)	M.O. (%)	
			eau	KCl		>2000 µm	0.2-2 mm	50-200 µm		pyro	REG			
Hf			5.2	3.3	95.3	8.5	81.5	5.7	4.4	89.9	6.3	14.27	3.9	96.1
Hf			5.4	3.5	94.7	18.0	79.4	1.2	1.5	97.3	8.3	11.73	3.3	96.7
Hf			5.6	3.7	94.7	22.4	42.9	17.1	17.6	65.3	12.8	5.10	5.7	94.3
Hf			6.0	4.9	93.3	11.0	50.7	19.2	19.1	61.7	24	2.57	5.4	94.6

Hor.	échant.	prof. (cm)	Eléments mobilisables						rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
			CEC (meq/100g)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)							
Hf			106.7	0.42	0.11	0.07	0.08	3.10	0.60	44.6	6.01	73.8	1.60	
Hf			137.0	0.33	0.09	0.02	0.05	2.60	0.57	45.0	6.18	79.3	1.64	
Hf			102.0	0.45	0.09	0.02	0.05	3.90	1.24	47.0	5.99	37.9	1.52	
Hf			103.1	0.81	0.12	0.01	0.05	6.30	1.85	49.7	6.26	26.9	1.50	

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité		densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative								
			totale (%)	macro (%)		mésomicro (%)	capacité de rét. en eau (%)	sphaignes (%)	mousses (%)	herbes (%)	ligneux (%)	bois (%)	agrégats (%)	
Hf									25.8	23.0	37.8	2.2	1.2	10.0
Hf									53.8	27.1	8.4	4.5	2.1	4.1
Hf									76.5	6.5	9.7	4.7	0.4	2.3
Hf									71.4	2.0	23.1	2.0	0.6	0.9

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

4.2.4.11. Série des marais tremblants, stade 3, Bellelay

Avec le troisième stade, localisé dans une fosse voisine, un certain nombre d'horizons commencent à se marquer plus nettement. Ceci est à mettre en relation avec la différenciation d'un petit complexe replat-butte au niveau du tapis de sphaignes. Marquée par *Carex lasiocarpa*, la végétation présente surtout une différenciation au niveau de la strate muscinale avec apparition de *Polytrichum strictum* et de *Sphagnum magellanicum*, au côté de *Sphagnum angustifolium*. Le solum marque déjà cette différenciation avec des horizons fragmentaires formés spécifiquement de tourbe avec séparation des deux espèces de sphaignes et un mélange avec le Polytric. Par la présence importante de *Carex lasiocarpa*, tous les horizons sont marqués par une forte proportion de structures herbacées. A noter que l'horizon du fond, déjà à partir de 35 cm de profondeur, présente les caractéristiques de l'ancienne tourbe, avec une forte dominance de structures herbacées (faisceaux des feuilles et racines de laîches) encore fibreuses. Un mélange avec les structures jeunes qui ont recolonisé la fosse a été noté.

Quatre échantillons ont été prélevés du haut vers le bas pour tester l'évolution et 2 échantillons supplémentaires ont été récoltés vers la surface, sous la petite butte. Le tableau 20 présente les résultats des différentes analyses et la figure 46 le dessin du profil du solum.

Caractéristiques générales

L'acidité n'appelle aucun nouveau commentaire.

L'ancienne tourbe, identifiable grâce aux macrofossiles se marque également au niveau des résultats physico-chimiques des analyses. Bien que fibreux, son taux est le plus faible du profil. Elle possède l'indice pyro le plus élevé ainsi qu'un fort taux de cendres. La CEC, faible pour le reste du profil à l'exception de la tourbe prélevée dans la butte, est nettement plus haute que pour les horizons supérieurs. Elle a un fort taux d'azote provoquant une diminution nette du rapport C/N et une augmentation assez marquée de la concentration en calcium. Ce résultat est en parfait accord avec les travaux de GILLER & WHEELER (1988) qui ont analysé les fluctuations des éléments chimiques principaux dans un profil stratifié selon les mêmes caractéristiques qu'ici, avec des horizons de tourbe à sphaignes jeunes posés sur une tourbe ancienne à herbacés.

Ces résultats présentent une nette similitude avec l'horizon profond du stade précédent à l'exception de la CEC qui semble en l'occurrence en relation étroite avec la composition botanique. Si dans ce stade, il est aisé de différencier à cette profondeur l'âge de la tourbe par sa composition en fibres, le stade précédent n'offre pas la même assurance par une forte proportion de sphaignes qui masquent l'augmentation nette de la part des laîches. La plus faible valeur de la CEC serait donc directement en relation avec la présence de sphaignes jeunes entraînées et mélangées à cette tourbe lors des mouvements de l'eau dans la fosse des stades 1 et 2. Au stade 2, l'analyse stratigraphique par les macrofossiles nous font placer la limite de l'ancienne tourbe à 68 cm, avec un sondage effectué plus près du stade 1 si bien que...

Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE, rajeuni, soligène à tendance ombrogène en surface, mésotrophe
--

Figure 46: Profil pédologique, stade 3, série des marais tremblants

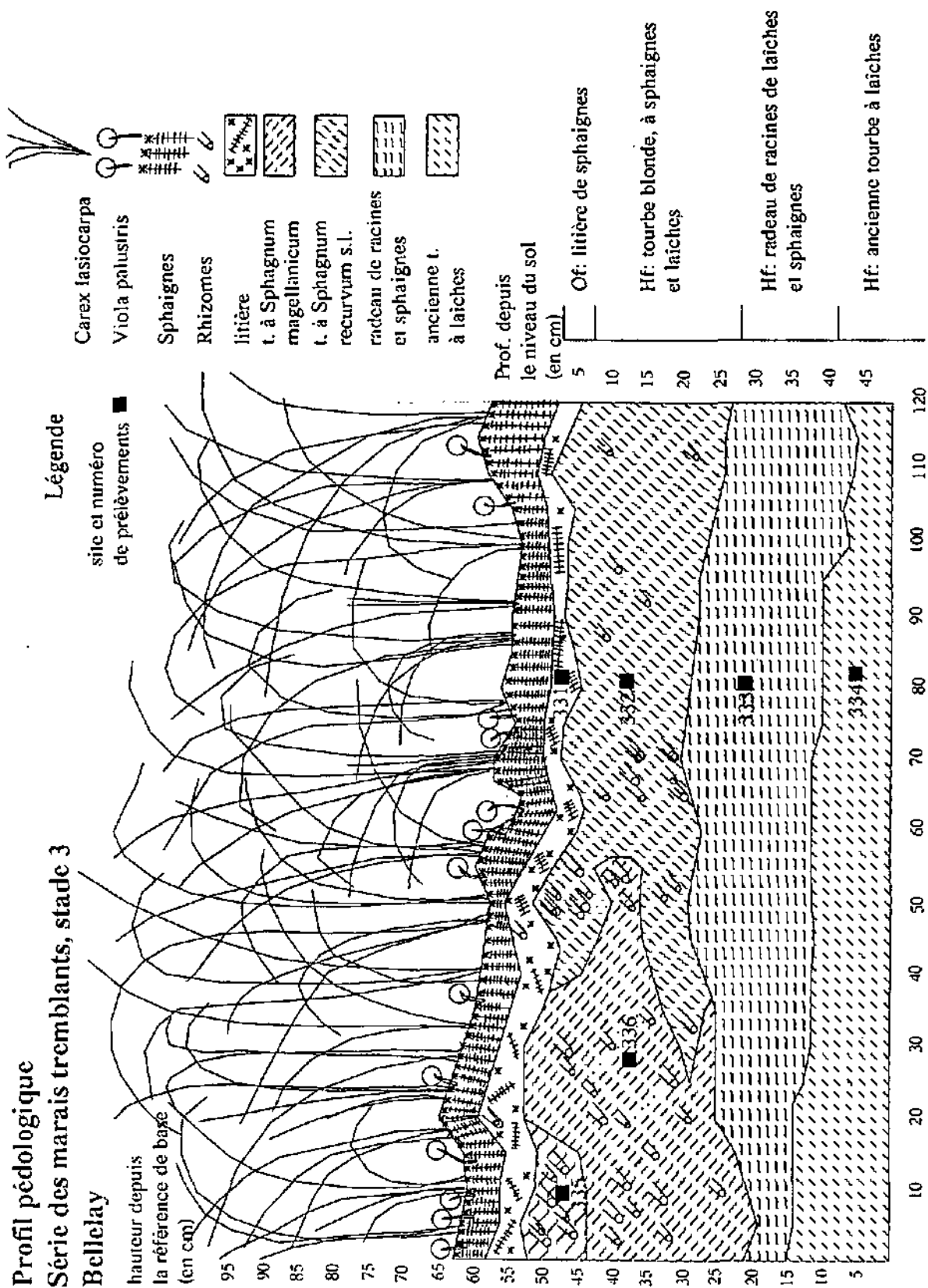


Tableau 20: Résultats pédologiques, stade 3, série des marais tremblants

Résultats des analyses de sol, série des marais tremblants, stade 3

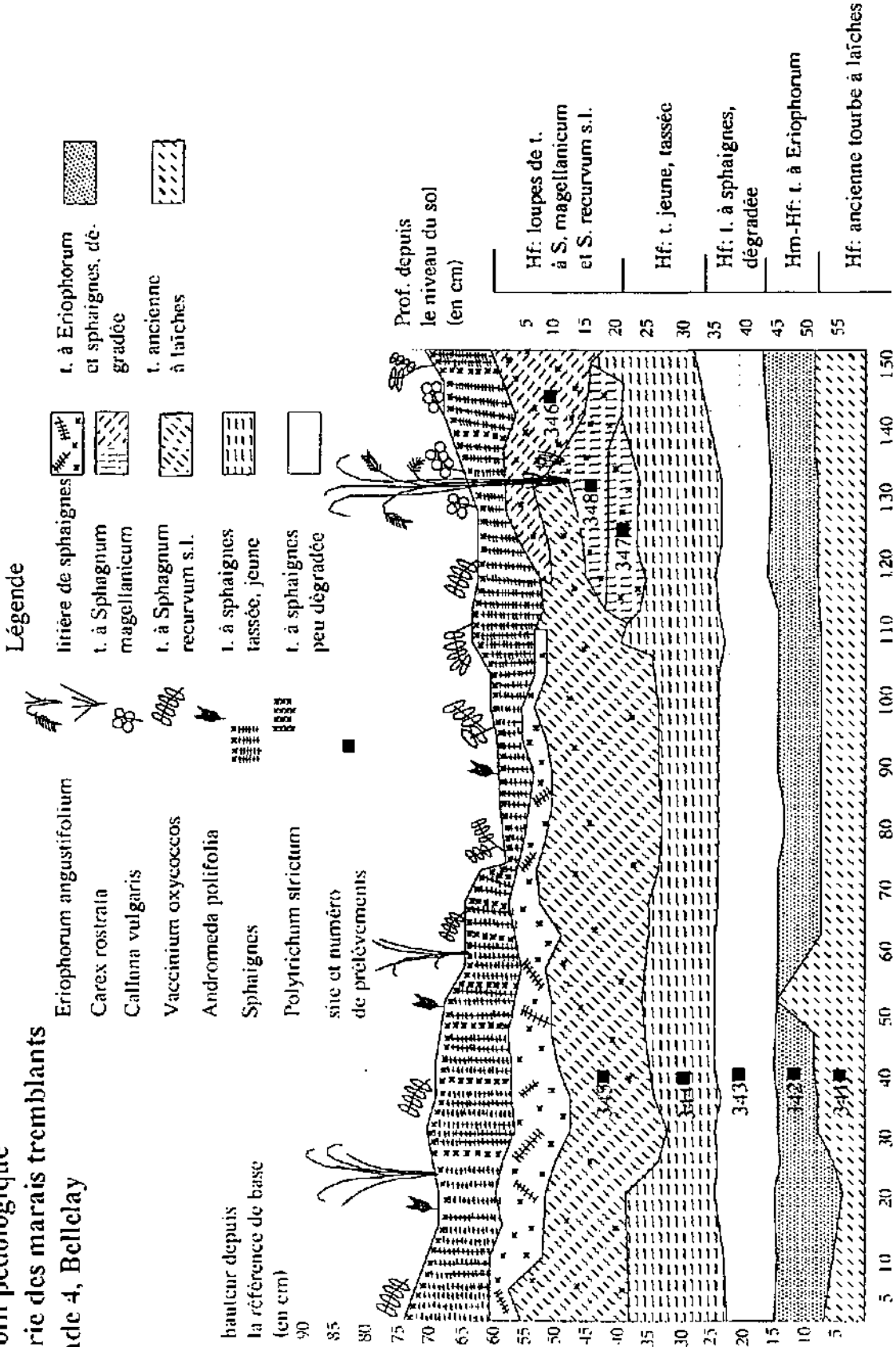
Hor.	échant.	prof. (cm)	pH		eau (%)	fractions granulométriques (% du pds sec)			fibres (%)	indice		cendres (%)	M.O. (%)	
			eau	KCl		>2000 µm	0.2-2 mm	50-200 µm		0-50 µm	pyro			KEG
Hf	331	0-4	5.3	4.1	92.3	13.6	71.4	5.6	9.4	85.0	5.7	11.9	4.2	95.8
Hf	332	10-15	5.8	3.9	92.9	44.7	42.4	8.0	4.9	87.1	9.7	8.98	4.9	95.1
Hf	333	30-35	5.4	4.1	95.2	32.3	52.6	8.4	6.7	84.9	10.8	7.86	4.5	95.5
Hf	334	35-45	6.1	4.1	90.5	15.6	57.3	16.9	12.3	70.8	20	3.54	19.1	80.9
Hf	335	4-10	5.5	4.0	92.9	31.7	57.4	4.6	6.3	89.1	9.3	9.58	5.8	94.2
Hf	336	20-25	5.3	4.1	94.2	35.8	52.0	10.1	2.1	87.8	8.8	9.98	4.6	95.4

Éléments mobilisables													
Hor.	échant.	prof. (cm)	CEC (méq/1000g)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	rapport Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	H/C
Hf	332	10-15	88.5	0.32	0.12	0.11	0.05	2.60	0.92	46.4	6.45	50.4	1.66
Hf	333	30-35	74.5	0.34	0.09	0.04	0.05	3.90	0.78	46.9	6.06	59.9	1.54
Hf	334	35-45	131.9	0.50	0.08	0.04	0.05	6.30	2.28	50.3	6.06	22.1	1.43
Hf	335	4-10	109.8	0.35	0.11	0.11	0.07	3.20	0.58	45.5	5.73	77.8	1.50
Hf	336	20-25	110.1	0.39	0.12	0.11	0.06	3.20	0.66	45.6	5.96	69.5	1.56

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité			densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative																	
			totale (%)	macro (%)	micro (%)		capacité de rét. en eau (%)	sphajogènes (%)	mousses (%)	herbes (%)	lichens (%)	bois (%)	agrégats (%)											
Hf	331	0-4																						
Hf	332	10-15																						
Hf	333	30-35																						
Hf	334	35-45																						
Hf	335	4-10																						
Hf	336	20-25																						

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

Profil pédologique
Série des marais tremblants
stade 4, Bellelay



4.2.4.12. Série des marais tremblants, stade 4, Bellelay

Le quatrième stade, vu la structure végétale très évoluée qu'il présente, a été analysé en détail quant à son histoire évolutive. Placé dans une fosse sans relation avec les trois autres stades, au régime hydrique moins dépendant des écoulements minérotrophes de l'arrière pays par la présence d'une cuvette dans le substrat argileux (NATURA, 1988), ce site s'inscrit néanmoins parfaitement dans l'histoire des exploitations de Bellelay. Nous avons ainsi retrouvé l'ancienne tourbe à laïches à partir de 40 cm, ce qui correspond également à notre horizon profond. Comme pour le stade 3, des horizons se marquent sous forme de loupes identifiées par la dominance des espèces de sphaignes constitutives. La différenciation replat-butte est nettement mieux marquée avec la présence du cortège d'espèces caractéristiques du *Sphagnion magellanicum*. L'analyse de la composition botanique montre la création d'une tourbe à sphaignes et *Eriophorum* caractéristique. Comme pour le stade précédent, l'échantillonnage a été effectué selon la différenciation verticale (5 prélèvements) et en relation avec les petits horizons fragmentaires (3 prélèvements).

La figure 47 illustre ce profil et le tableau 21 présente les résultats des analyses.

Caractéristiques générales

L'acidité n'est pas particulièrement forte malgré la présence de sphaignes de buttes (*Sphagnum magellanicum*). Ce résultat est très intéressant car il indique que l'observation relative au volume d'eau s'écoulant depuis l'amont est peut-être faussée. Il peut également signaler un âge faible pour l'édification des buttes, encore très peu décomposées. L'accumulation des acides produits par les sphaignes est donc faible. L'analyse des macrofossiles a montré une mince couche de tourbe jeune (30 à 40 cm) ce qui peut corroborer cette hypothèse.

Le taux de fibres diminue fortement dans le premier horizon de tourbe rajeunie, alors que son taux de cendres augmente légèrement. L'indice pyro est faible pour les loupes de tourbe à *Sphagnum magellanicum*, en relation avec la butte, et moyen ailleurs.

La CEC est nettement plus élevée qu'au stade précédent et décroît avec la profondeur. Elle augmente à nouveau dans la tourbe ancienne. Comme pour les autres profils, la concentration en calcium est légèrement supérieure dans l'ancienne tourbe mais dans une faible proportion. Le magnésium est bas et constant alors que le potassium et le sodium montrent une légère augmentation de valeur dans l'horizon supérieur. Le rapport C/N est également plus haut au niveau de la butte et confirme le résultat du stade 3, tout comme sa petite valeur dans la tourbe ancienne par augmentation du taux d'azote.

Diagnostic:

HISTOSOL FIBRIQUE, rajeuni, ombrogène, mésotrophe.

Résultats des analyses de sol, série des marais tremblants, stade 4

Tableau 21: Résultats pédologiques, stade 4, série des marais tremblants

Hor.	échant.	prof. (cm)	pH eau	pH KCl	eau (%)	fractions granulométriques (% du poids sec)				fibres (%)	indice pyro	indice cendres (%)	M.O. (%)	
						>2000 µm	0.2-2 mm	50-200 µm	0-50 µm					
	345	5-10	5.1	3.4	93.0	32.0	52.9	7.1	8.1	84.8	11.9	7.13	3.8	96.2
	344	15-25	5.3	3.1	93.2	25.3	58.9	9.2	6.6	84.2	14.1	5.97	4.0	96.0
	343	25-35	5.0	3.6	95.0	11.2	76.6	9.1	3.1	87.8	16.2	5.42	4.3	95.7
	342	35-40	5.1	4.0	91.0	9.4	32.5	28.7	29.3	41.9	15.9	2.64	11.6	88.4
	341	40-50	5.3	4.1	87.8	25.9	38.1	26.5	9.5	64.0	16.2	3.95	5.6	94.4
	346	0-10	4.9	3.1	92.7	42.3	39.4	6.3	12.0	81.7	10.5	7.78	3.7	96.3
	348	10-15	5.0	3.1	94.0	24.4	57.4	10.1	8.0	81.9	8	10.23	3.6	96.4
	347	15-20	5.1	3.2	93.9	13.7	72.4	3.3	10.6	86.1	7.4	11.63	7.6	92.4

Hor.	échant.	prof. (cm)	Eléments mobilisables										H/C
			CEC meq/100g	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	rapp. Ca/Mg	N (%)	C (%)	H (%)	C/N	
	345	5-10	129.5	0.35	0.08	0.03	0.05	4.30	0.95	46.9	5.48	49.4	1.39
	344	15-25	127.5	0.43	0.08	0.02	0.05	5.20	0.72	47.3	5.59	65.3	1.41
	343	25-35	128.0	0.36	0.08	0.02	0.05	4.70	1.25	47.3	5.81	37.7	1.47
	342	35-40	100.5	0.39	0.08	0.03	0.05	4.70	2.37	50.2	6.43	21.2	1.53
	341	40-50	114.9	0.45	0.08	0.03	0.05	6.10	2.13	54.3	6.47	25.5	1.42
	346	0-10	116.9	0.31	0.09	0.05	0.05	3.60	0.56	45.9	5.88	81.7	1.53
	348	10-15	108.5	0.36	0.08	0.03	0.05	4.40	0.73	46.1	5.98	63.5	1.55
	347	15-20	104.3	0.28	0.08	0.02	0.05	3.40	0.88	46.4	5.81	52.7	1.49

Hor.	échant.	prof. (cm)	porosité		densité apparente (g/cm ³)	composition botanique relative													
			totale (%)	macro (%)		capacité de rét. en eau (%)	sp. ligneux (%)	herbes (%)	mousses (%)	bois (%)	agrégats (%)								
	345	5-10																	
	344	15-25																	
	343	25-35																	
	342	35-40																	
	341	40-50																	
	346	0-10																	
	348	10-15																	
	347	15-20																	

Le rapport Ca/Mg est calculé sur la base des valeurs exprimées en %

4.3. ANALYSE STRATIGRAPHIQUE PAR LA DETERMINATION DES MACROFOSSILES

4.3.1. Méthode

L'approche stratigraphique par l'analyse pollinique est pratiquée depuis longtemps dans les tourbières tout comme la prise en compte des macrofossiles végétaux, pour la qualification des sols tourbeux ou pour retracer l'histoire de la colonisation végétale. Nous ne citerons pas ici ces nombreuses recherches mais signalons néanmoins les nombreux travaux de G. GROSSE-BRAUCKMANN en Allemagne fournissant autant les clefs de détermination que des résultats pour de nombreux marais tout comme ceux des équipes de M. P. LEVESQUE et de H. DINEL pour le Canada.

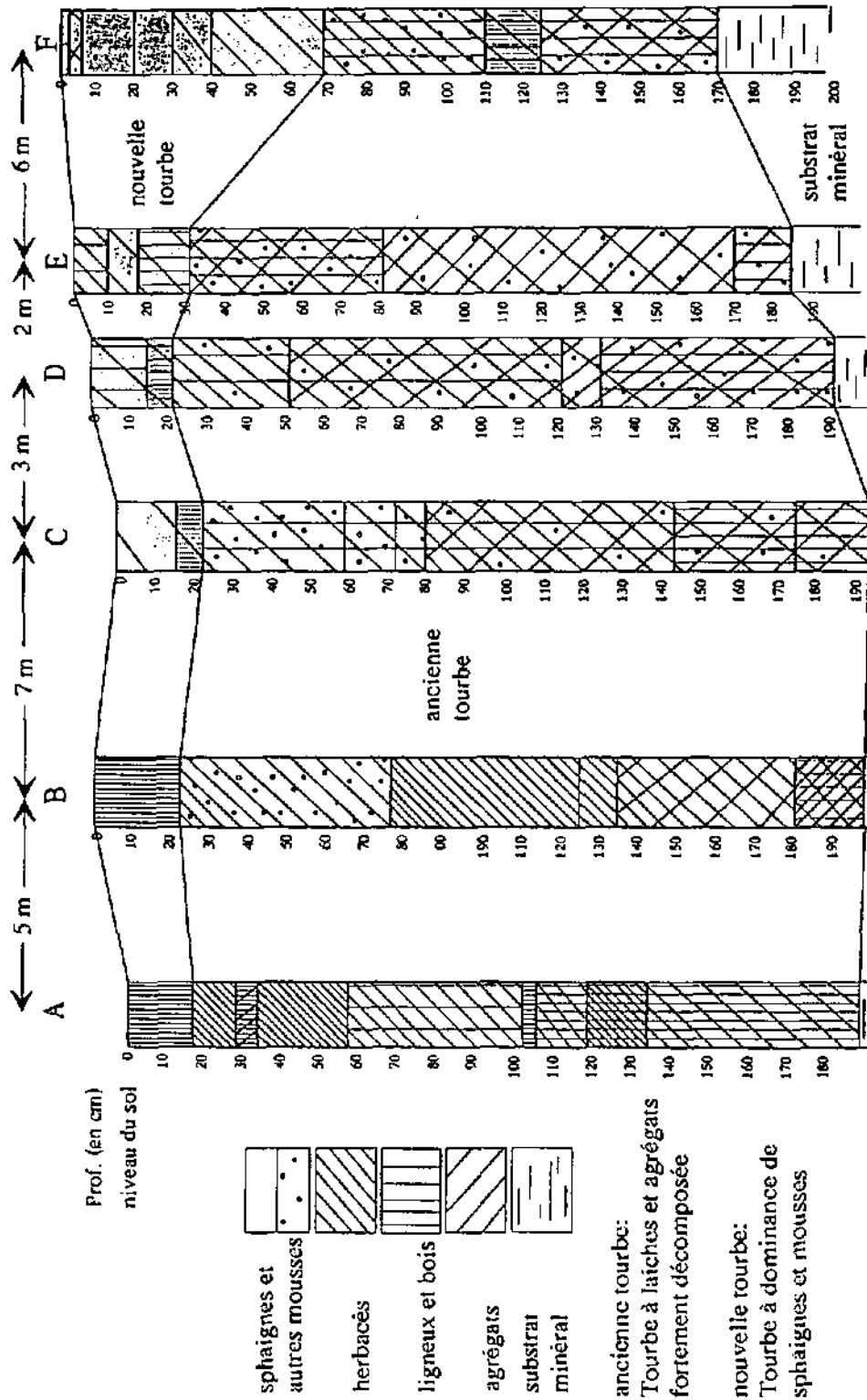
La finesse de détermination et le degré de complexité des fractions identifiées sont étroitement liés aux buts visés par les chercheurs. Ainsi, KIVINEN (1977) estime suffisant de différencier les muscinées, les herbacées et le bois. CLYMO (1983) préconise lui une séparation des muscinés entre "sphaignes et "autres mousses". Au Canada, LEVESQUE & MILLETTE (1977) considèrent les même catégories que KIVINEN alors qu'en 1981, LEVESQUE *et al.*, puis en 1982, LEVESQUE & DINEL préconisent de prendre en compte le degré de décomposition des éléments identifiés par une étude micromorphologique détaillée. Ces considérations visent la qualification des horizons tourbeux par le déterminisme du degré de décomposition de la tourbe et sa mesure. Les recherches de BUTTLER *et al.* (1994) vont dans le même sens en détaillant les catégories en six fractions: Sphaignes, autres mousses, herbacés, éléments linéaires ligneux, morceaux de bois et agrégats.

DINEL *et al.* (1986), en complément aux analyses polliniques, utilisent les trois catégories de KIVINEN (1977) pour retracer l'histoire de la végétation du site étudié. GRANDVOINET *et al.* (1988) décrivent l'histoire d'un haut-marais de Franche-Comté par une double approche identique mais en attribuant l'appartenance des horizons de tourbe selon l'espèce constitutive dominante (t. à *Typha*, t. à cypéracée et t. à sphaignes). P. D. MOORE (1977) détaille les macrofossiles à l'espèce et différencie de plus les proportions de racines, de tiges, de feuilles, etc. JANSSENS (1983a) définit une méthode d'évaluation quantitative des proportions de sphaignes dans un volume de sol donné par reconnaissance et comptage de la nature et de l'état de décomposition des fragments. Enfin, SVENSON (1988) pousse le déterminisme très loin (différenciation des sphaignes à l'espèce ou au moins à la section, des autres mousses, des éricacées et d'*Eriophorum vaginatum*) afin de mettre en évidence des cycles de développement buttes-gouilles à travers le profil au moyen de la fluctuation des fréquences relatives entre *Calluna vulgaris*, *Eriophorum vaginatum* et les différentes sphaignes.

Pour notre part, comme nous l'avons précisé dans le descriptif détaillé de la méthode (c.f. chapitre 1.3.4.), nous avons travaillé selon deux niveaux de perceptions distincts. Les 6 catégories définies par BUTTLER *et al.* (1994) ont été choisies pour les analyses complémentaires aux analyses pédologiques classiques. Pour l'étude stratigraphique des transects à travers les fosses de Bellelay, nous avons maintenu ces six catégories en détaillant celles des sphaignes, des mousses et des herbacées si possible à l'espèce. En complément, dans le but de retracer le plus précisément possible l'histoire de la recolonisation végétale des fosses, nous avons également noté le degré de dégradation physique des structures identifiées.

Figure 48: Stratigraphie selon les macrofossiles, transect 1-2, marais tremblants

L'intensité des symboles et hachures renseigne sur la proportion des différents constituants. L'annexe 6 donne les proportions exactes des 6 constituants analysés. Profils A et B: Forêt feuillue secondaire, C: lisière de *Polytrichum commune* sous *Épicéas*, D: manteau de sous-arbrisseaux à sphaignes, E: ourlet de laïches et sous-arbrisseaux à sphaignes, F: marais tremblant à sphaignes. La figure 33 présente la répartition des espèces sur le transect



Pour les trois transects décrits, nous avons choisi les points de sondage en fonction des limites de végétation. Six profils sont décrits pour le premier transect (stades évolutifs 1 et 2), cinq pour le deuxième (stade 3) et six à nouveau pour le troisième (stade 4).

Les figures 48, 49 et 50 illustrent la stratigraphie de ces transects en fonction des fractions dominantes par horizons et l'annexe 6 présente la proportion des six catégories végétales identifiées pour tous les échantillons.

4.3.2 Résultats et discussion

Une grande uniformité a été révélée quant à l'histoire ancienne de la tourbière de Bellelay. Tous les profils présentent une tourbe de fond identique, caractérisée par une forte abondance de cypéracées (*Carex rostrata*, selon certaines feuilles reconnaissables et les observations de FRUEH & SCHROETER (1904)). Très régulièrement, les 10 centimètres du fond, au contact de la marne montrent une augmentation des restes de bois, et ce, pour tous les transects. CLYMO (1983) indique la présence régulière de cet horizon ligneux et attribue ce fait à la nature végétale des premiers complements des marais. Au-dessus de cette tourbe dégradée, suite à un petit horizon d'intégration ou de dégradation, se développe une tourbe jeune, à sphaignes, d'épaisseur variable selon la position le long du transect.

Chaque transect concerne la transition actuelle entre la forêt secondaire et les marais tremblants. Du point de vue stratigraphique, les trois situations présentent une image générale identique avec la présence de la tourbe ancienne très proche de la surface sous les forêts et les manteaux préforestiers, puis une plongée abrupte de la profondeur de cette limite ancienne à partir des cariçaies ou du *Sphagnion magellanicum*. On met ainsi parfaitement en évidence les fosses creusées dans la masse de tourbe à la fin du siècle passé. Le fait que sous les forêts la tourbe de cypéracées dégradée forme l'entier du profil, exception faite d'une très mince couche de litière récente témoigne d'une première phase d'exploitation générale, qui a abaissé le niveau de tourbe sur tout le haut-marais, mettant à nu la tourbe de cypéracées. Ces résultats sont en parfait accord avec l'hypothèse de PARIAT (1988) qui présente ces deux phases d'exploitation. Ils indiquent également très clairement que la recolonisation végétale a été très rapide et en totale relation avec les conditions hydriques. Ainsi, les forêts sont toutes secondaires et ont recolonisé les parties hautes, sur les bancs de tourbes plus secs, alors que les fosses elles-mêmes, inondées et colonisées par *Carex rostrata* en 1904 (FRUEH & SCHROETER) ont permis la régénération par les sphaignes au point de les combler et de supprimer topographiquement les différences initiales de niveaux.

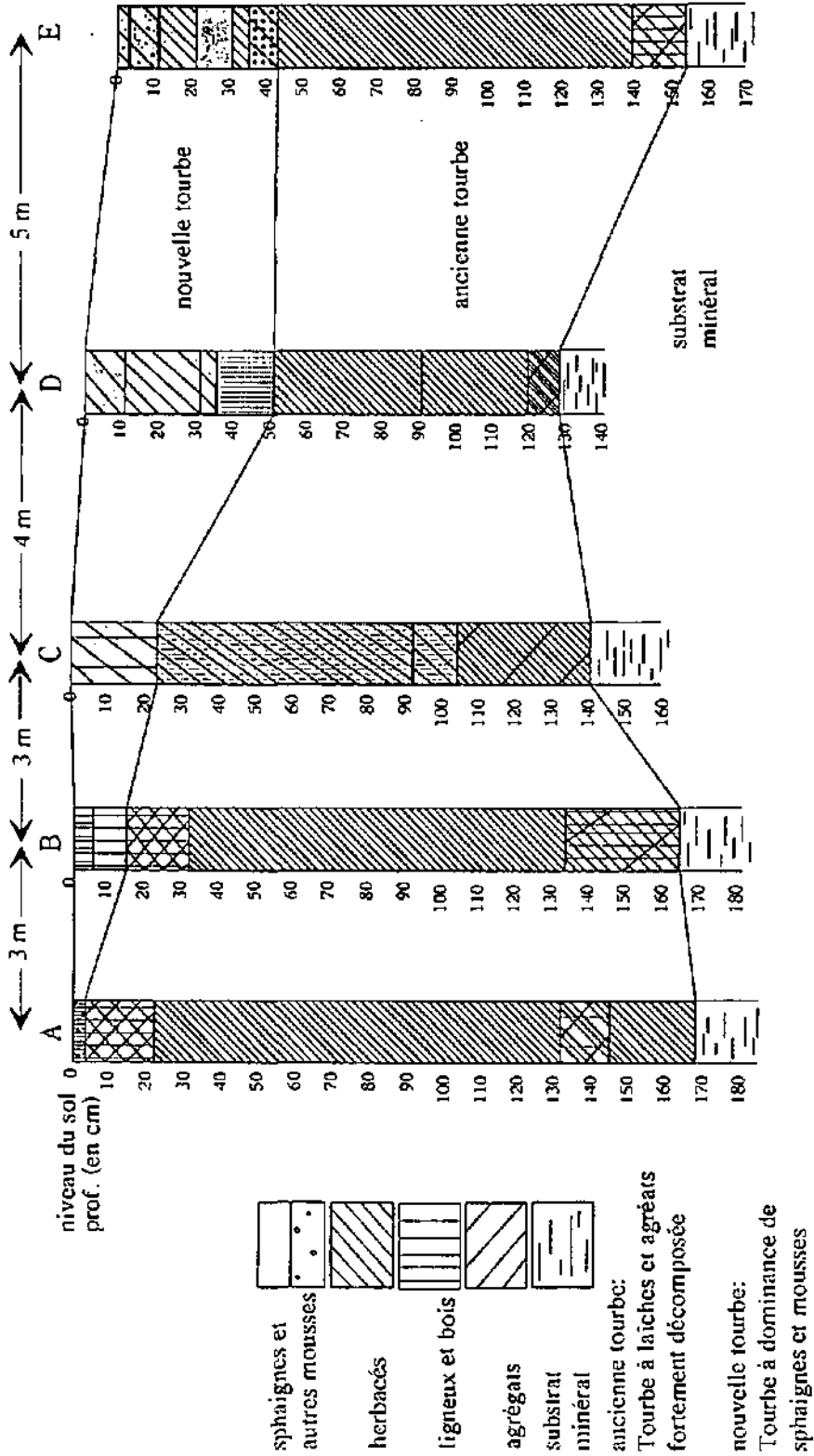
Ces résultats permettent de plus d'expliquer en partie pourquoi, dans le même marais et après le même laps de temps, certaines fosses sont encore à des stades évolutifs jeunes et très tremblants et d'autres déjà bien stabilisées avec un retour marqué vers la pinède de haut-marais.

La fosses des stades jeunes (1 et 2) a une profondeur de base assez importante avec l'horizon ancien env. 70 cm sous la surface végétale actuelle (fig. 48). La deuxième fosse (stade 3) a été creusée nettement moins profondément avec l'apparition de la tourbe ancienne à 43 cm de la surface végétale actuelle (fig. 49). Quant à la troisième fosse, avec le stade le plus évolué, le niveau correspondant est à 40 cm. Ces chiffres indiquent clairement qu'une bonne quantité de tourbe a été laissée en place au fond et que ces fosses étaient relativement modestes. Il n'est dès lors pas impossible d'imaginer qu'elles sont en fait les restes de fosses beaucoup plus profondes, creusées conjointement lors de la première phase d'exploitation décrite par PARIAT et dont les profondeurs

Figure 49: Stratigraphie selon les macrofossiles, transect 3, marais tremblants

L'intensité des symboles et hachures renseigne sur la proportion des différents constituants. L'annexe 6 donne les proportions exactes des 6 constituants analysés. Profils A et B: Forêt feuillue secondaire, C: manteau avec sous-arbrisseaux et sphaignes, D: marais tremblant à sphaignes, replat avec caricaie, E. marais tremblant à sphaignes avec buttes.

La figure 34 présente la répartition des espèces sur le transect



ont été progressivement diminuées par l'extraction de la tourbe sur les mamelons formés entre chacune des fosses. Si l'on compare le marais de Bellelay avec ceux de la vallée des Ponts-de-Martel, une différence essentielle apparaît. Bellelay est un marais à fonctionnement soli-ombrogène, au substrat minéral en pente assez marquée en direction du ruisseau de la Rouge-Eau. Un écoulement minerotrophe le traverse, imposant à l'exploitant la mise en place d'une structure efficace pour éliminer ces eaux et drainer les zones d'extractions. Ce rôle est parfaitement accompli par ces fosses parallèles, perpendiculaires à l'axe de la pente. L'assèchement de la tourbe sur les mamelons était ainsi optimal, avec une limitation vers la profondeur liée à la quantité d'eau maintenue dans les fosses en fonction des débits à éliminer. Les sondages de NATURA (1988) ont montré l'existence d'un barrage naturel de marne en aval des fosses, limitant l'écoulement et réglant la profondeur "utile" à creuser pour une fosse efficace. Aux Ponts-de-Martel, les marais sont totalement ombrogènes. Les exploitants ont également creusé des fosses dans la masse de tourbe, mais elles sont totalement closes et n'accumulent que l'eau du drainage de surface par un dense réseau de rigoles superficielles aménagées sur les parties hautes. L'eau qui s'y accumule est donc oligotrophe.

Pour les trois fosses décrites, et parallèlement les 4 stades évolutifs, un gradient hydrique net existe. Les fosses les moins profondes ont un écoulement moins important que les fosses profondes. Comme cette eau est passablement mésotrophe, elle limite d'autant plus la rapidité pour la végétation de s'isoler et de créer un environnement oligotrophe en surface. Conjugué à la profondeur, il est facile de comprendre que l'accumulation végétale du stade 4 ait plus rapidement créé ces conditions oligotrophes, et assuré une régénération du *Sphagnion magellanicum*.

Les observations détaillées à l'espèce (mais non totalement exploitées) montrent très bien que sur la tourbe ancienne, (profil F du transect 3, fig. 50), le premier horizon est formé de *Sphagnum recurvum sensu lato* et qu'au-dessus sont apparus *Sphagnum magellanicum* avec *Polytrichum strictum*. Vu la faible épaisseur de tourbe jeune (40 cm), il est impossible de corréliser ces données avec les éricacées dont les racines sont abondantes à l'interface de régénération. Le profil E présente la même architecture. Le profil D reflète parfaitement la forte couverture de Polytrichs, alors que dès le profil C, la dominance des vacciniées vivantes est flagrante, l'ancienne tourbe apparaissant à 35 cm sous la surface. Cette profondeur est de 15 cm pour le profil B et de 12 cm pour le A. Fait remarquable, l'avance évolutive n'est pas uniquement mise en évidence au milieu de la fosse, mais également dans les forêts. Le stade 4 possède un sous-bois forestier totalement couvert de sphaignes dynamiques et posées sur l'ancienne tourbe.

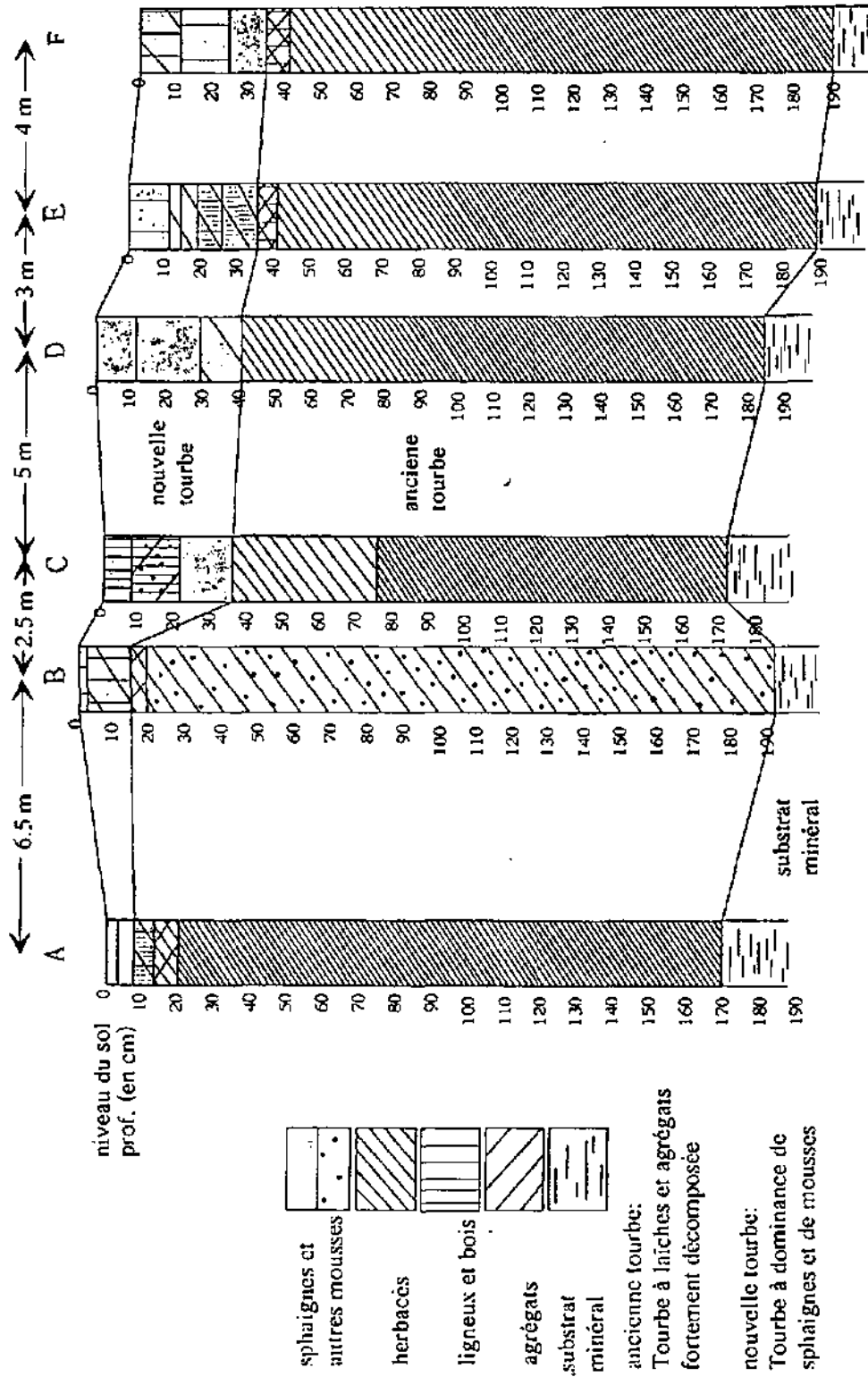
Ce tapis de *Sphagnum magellanicum* témoigne de la croissance latérale du tapis principal, initié au niveau de la fosse et régénérant par le sous-bois, les anciens boisements secs.

A l'autre extrême, le transect des stades 1 et 2 (fig 48) atteste que le dynamisme des sphaignes s'exprime encore aujourd'hui sous forme de croissance verticale dans la fosse en compagnie de *Potentilla palustris*, d'*Equisetum fluviale* (profil F) et qu'au niveau du profil A, le sous-bois forestier ne possède qu'un petit pourcent de sphaignes en surface, témoin de rares coussinets pionniers.

Il faut noter de plus que l'impression du promeneur qui se déplace à travers ces fosses n'est que partiellement confirmée par l'analyse des macrofossiles. Aux stades 1, 2 et 3, l'impression laissée au centre de la fosse est celle d'un radeau flottant sur une masse d'eau, avec un enfoncement con-

Figure 50: Stratigraphie selon les macrofossiles, transect 4, marais tremblants

L'intensité des symboles et hachures renseigne sur la proportion des différents constituants. L'annexe 6 donne les proportions exactes des 6 constituants analysés. Profils A: Forêt feuillue secondaire, B: lisière avec sous-arbrisseaux et sphaignes, C: manteau avec sous-arbrisseaux et sphaignes, D: ourlet à *Polytrichum* commune et sphaignes, E: *Sphagnion magellanicum*, replat. F: *Sphagnion magellanicum*, butte. La figure 35 présente la répartition des espèces sur le transect



sidérable de la jambe dans le tapis gorgé d'eau. On est alors loin d'imaginer la tourbe en place 68 cm plus bas, voir même 43 cm seulement. En fait, l'analyse des macrofossiles révèle que l'engorgement en eau au niveau des fosses se fait jusqu'en profondeur, provoquant certainement un gonflement de l'ancienne tourbe. En effet, il a été surprenant de mettre en évidence des feuilles de sphaignes et parfois de petits rameaux non décomposés jusqu'à la profondeur de la marne pour les profils localisés dans la fosse et principalement pour les stades 1 et 2. Le stade 3 présente des sphaignes mais elles ne forment pas une proportion considérable. Pour le stade 4, un très petit nombre a été observé et ce, jusqu'au fond. Ce phénomène est donc corrélé avec la quantité d'eau s'écoulant dans la fosse. Nous pouvons même supposer que la quantité d'eau n'est pas le facteur principal mais son mouvement et ses fluctuations oui. En effet, la première fosse présente d'évidents mouvements généraux de gonflements et d'affaissements verticaux, en fonction du niveau de la nappe. Il n'est dès lors pas exclu que, comme au Cachot pour la série des gazons de mousses, un entraînement des feuilles de sphaignes puisse avoir lieu vers la profondeur à travers les macropores induits par le gonflement.

Aux stades 1, 2, et 3, il n'y a aucune sphaigne dans la masse de vieille tourbe au niveau du profil forestier. Elles n'apparaissent qu'avec l'existence du tapis de sphaignes en surface. *Les profils forestiers prouvent donc que la tourbe à cypéracées reflète indéniablement l'absence de sphaignes dans les phases primaires de formation du marais de Bellelay* et donc la migration verticale uniquement de ces feuilles en terrains imbibés et gonflés.

Dès lors, pourquoi cette eau ne parvient-elle pas à imbiber le mamelon de tourbe jusqu'en surface, accélérant la régénération en provoquant des échanges latéraux?

Nous n'avons pas de réponse claire à formuler sinon l'hypothèse d'une densité plus importante, maintenue suffisamment fortement par la pression des grands arbres. Cette question reste ouverte pour de prochaines études.

4.4. CLASSIFICATION DES TOURBES

4.4.1. Introduction

La classification des tourbes est basée classiquement sur le degré de décomposition physique (exprimé par la teneur en fibres) et le degré de décomposition chimique (mesuré par l'indice pyro).

Le taux de fibres sert à définir les trois domaines fondamentaux selon les catégories proposées par SSSA (1974) et BASCOMB *et al.* (1977):

- tourbe fibrique (fibrist) : > 40% de fibres en % du poids sec
- tourbe mésique (hemist) : de 10 à 40% de fibres
- tourbe saprique (sapist) : < 10% de fibres

Pour cette classification, le taux de fibres est défini par la technique des fibres frottées (méthode de la seringue (LYNN *et al.* 1974)) et considère une relation volume/volume en fonction d'un taux d'humidité constant. Ce sont les fibres frottées qui permettent de classer les échantillons selon la hiérarchisation proposée par la commission canadienne de pédologie (1978) selon SSSA (1974).

Comme l'indiquent LEVESQUE & DINEL (1977), l'utilisation de la technique de la seringue ne permet pas de garantir un travail régulier et totalement reproductible car il nécessite de "frotter" l'échantillon entre les doigts pour casser les fibres les plus décomposées et démonter les macro-agrégats. Dès lors, dès 1976, ces auteurs ont tenté de standardiser la détermination du taux de fibres en proposant une méthode semi-automatique (DINEL & LEVESQUE, 1976, LEVESQUE & DINEL, 1977).

Nous avons repris cette méthode qui présente l'avantage de permettre, outre la détermination du taux de fibres, la séparation des tourbes en fractions granulométriques. Elle se pratique par tamisage en milieu aqueux. Selon les tests canadiens, elle présente un intérêt évident mais fournit *a priori* des résultats différents par comparaison à ceux obtenus pour les fibres frottées (LEVESQUE et al. 1981), si bien que l'utilisation de ces valeurs granulométriques pour calculer le taux de fibres et le calquer sur la classification de SSSA (1974) peut poser des problèmes.

Conscient de ces difficultés, le Laboratoire d'écologie végétale de l'université de Neuchâtel a effectué diverses séries de tests comparatifs quant à l'utilisation du tamisage en milieu aqueux, afin de préciser un mode opératoire assurant des résultats comparables à ceux obtenus par la méthode de la seringue mais fournissant une séparation granulométrique plus importante du matériel (GOBAT *et al.* 1986 et 1991). Ces tests considèrent le volume et la masse de l'échantillon, la durée et le type d'agitation du matériel avant le tamisage (avec ou sans billes), le type de tamisage (automatique ou manuel), la durée de celui-ci et le nombre de tamis. Le standard retenu considère:

Echantillon: 25 g frais
Agitation: sans billes
Tamisage: automatique sous flux d'eau, durée de 30 minutes
Fractionnement: 3 tamis (2000 μm , 200 μm et 50 μm)

Cette technique de laboratoire tient compte des propositions méthodologiques de DINEL & LEVESQUE (1976) et LEVESQUE & DINEL (1977). Elle donne des résultats parfaitement comparables. En particulier, le taux de fibres exprimé n'est pas significativement surévalué par rapport au taux de fibres frottées standard. Sans une comparaison absolue (ce que nous n'avons pas effectué), il n'est pas impossible que nos valeurs soient légèrement plus hautes mais sans provoquer des changements majeurs de catégories lors de la classification. Nous justifions cet avis par:

- L'échantillon est agité 16 h. dans de l'eau ce qui démonte déjà fortement les macro-agrégats et casse les fibres les plus décomposées.
- Avant le tamisage semi-automatique, l'échantillon est tamisé manuellement à 50 μm afin d'éliminer le matériel fin et permettre une circulation d'eau propre dans l'appareil.
- Lors de ce travail, un frottement entre les doigts est nécessaire pour assurer un bon lavage.
- Finalement, les mailles européennes sont standardisées à 200 μm alors qu'au Canada, les tamis ont 100 mailles/pouces, ce qui équivaut à env. 150 μm . Nos résultats devraient dès lors être sous-évalués.

L'analyse granulométrique en quatre fractions ou plus des horizons histiques (AFES, 1992) permet une classification plus détaillée de chaque horizon du solum. Sur la base du triangle granulométrique des sols minéraux, nous proposons un triangle granulométrique organique adapté aux sols

tourbeux (GOBAT *et al.* 1991). Ce triangle est le fruit d'une analyse de plus de 200 échantillons de tourbe prélevés dans un maximum de milieux caractérisant les hauts-marais jurassiens. Nous analyserons ici la classification granulométrique de nos trois séries.

Dans un deuxième temps, nous aborderons la classification sous l'angle de l'état de décomposition chimique du matériel analysé selon LEVESQUE & DINEL (1977), LEVESQUE *et al.* (1980, 1981), BASCOMB *et al.* (1977), GOBAT & PORTAL (1985) et GOBAT *et al.* (1986).

Nous tenterons de cerner l'influence minérotrophe par une classification basée sur les résultats des analyses élémentaires en testant le rapport Ca/Mg (MATTSON *et al.* 1944, CHAPMAN 1964, LEVESQUE & MILLETTE 1977) ainsi que le rapport H/C (ANDREUX 1978, *in* GOBAT & PORTAL, 1985).

Enfin nous discuterons les valeurs des corrélations calculées entre chaque paramètre analysé.

4.4.2. Classification basée sur la composition granulométrique des tourbes

4.4.2.1. Méthode

Le triangle granulométrique est présenté à la figure 51. Par analogie au triangle des sols minéraux, il est construit en trois dimensions, avec la somme des trois côtés valant 100% pour chaque échantillon. L'ensemble du matériel testé est pris en compte.

Un côté exprime la somme du matériel inférieur à 50 μm , en % du poids sec total de l'échantillon. Il illustre les particules fines et les microagrégats.

La deuxième face définit la somme du matériel compris entre 50 μm et 200 μm . Ce sont les particules moyennes, les tissus déchirés et les macroagrégats.

Le troisième côté exprime le taux de fibres avec la somme du matériel supérieur à 200 μm . Il illustre les particules organiques grossières.

Ces seuils ont été choisis pour être compatibles avec la classification générale, basée sur le taux de fibres (200 μm). Pour le seuil inférieur, la limite à 50 μm met en évidence les éléments les plus fins du matériel végétal ainsi que d'éventuels microagrégats organo-minéraux dans les tourbes dégradées ou les bas-marais (BRUCKERT *et al.* 1978, BRUCKERT *in* : BONNEAU & SOUCHIER, 1979). Ces limites permettent donc une classification "texturale" mais aussi "microstructurale".

Le triangle est divisé intérieurement en 13 cellules visant:

- 1° L'attribution de l'échantillon à la classification internationale (Fibrique, Mésique et Saprique). La séparation se fait par deux limites horizontales à 10% et 40%. La désignation des 13 cellules est liée à ces trois domaines de base.
- 2° La répartition relative en particules fines et moyennes au sein de chaque domaine de base conduit la constitution des cellules. Le domaine fibrique est divisé en 4 cellules. Au-dessus de 70% de fibres, nous n'avons volontairement pas créé de sous-division car nous avons jugé que le caractère fibrique était largement dominant pour le comportement du sol. Six cellules précisent le domaine mésique alors que le domaine saprique est divisé en 3 cellules. La position des limites a été décidée sur la base de divers essais intégrant l'ensemble des 200 échantillons jurassiens. Elles sont symétriques et calculées sur des bases arithmétiques.

Figure 51: Triangle granulométrique organique avec le "domaine granulométrique" de nos trois séries.
Explication dans le texte

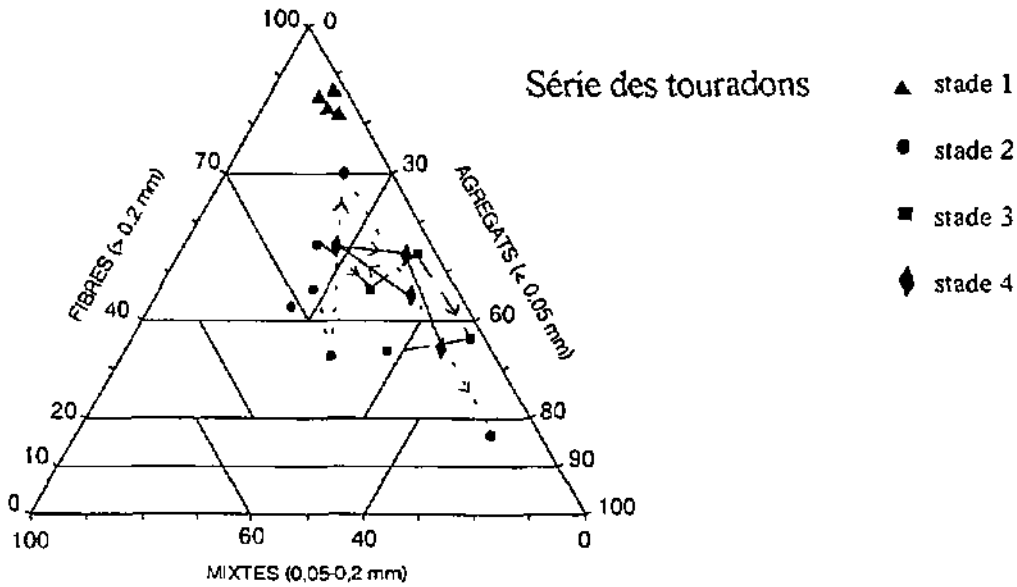
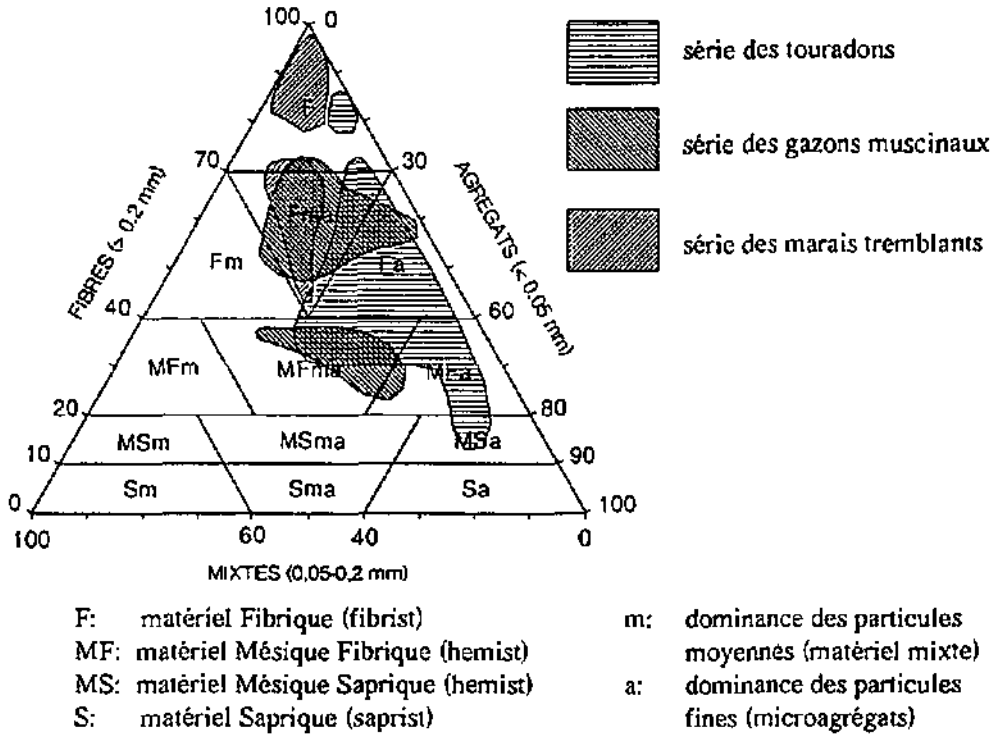


Figure 52: Classification granulométrique des tourbes de la série des touradons et évolution pédologique de chaque stade décrit

Le tableau 22 présente les limites granulométriques des diverses catégories. La nomenclature choisie définit les qualités texturales et microstructurales du matériel tourbeux. Elle est compatible avec les codes nomenclatureaux du Référentiel Pédologiques des Sols d'Europe (AFES, 1992). Il suffit d'ajouter un "H" à la qualification de l'échantillon pour désigner l'horizon pédologique correspondant. A partir de là, la typologie du sol lui-même est possible.

La codification est nommée selon le principe suivant:

- Première lettre en MAJUSCULE. Elle définit le domaine principal:

F = matériel Fibrique

M = matériel Mésique

S = matériel Saprique

- Une deuxième MAJUSCULE est définie pour le matériel mésique uniquement:

MF = matériel Mésique Fibrique

MS = matériel Mésique Saprique

- Une minuscule définit la granulométrie secondaire de l'échantillon avec:

m = dominance de particules moyennes (50 à 200 μ m) et de qualité mixte, avec des macro- et microagrégats figurés.

a = dominance de particules fines (0 à 50 μ m) formées de microagrégats.

Tableau 22: Valeurs limites des classes granulométriques et désignation des cellules (GOBAT *et al.* 1991)

TYPE	MATERIEL	FIBRES		MIXTES		AGREGATS	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
F	Fibrique pur	70	100	0	30	0	30
Fm	Fibrique à mixtes	40	70	30	60	0	30
Fma	Fibrique à mixtes et agrégats	40	70	0	30	0	30
Fa	Fibrique à agrégats	40	70	0	30	30	60
MFm	Mésique Fibrique à mixtes	20	40	50	80	0	30
MFma	Mésique Fibrique à mixtes et à agrégats	20	40	10	50	10	50
MFa	Mésique Fibrique à agrégats	20	40	0	30	50	80
MSm	Mésique Saprique à mixtes	10	20	60	90	0	30
MSma	Mésique Saprique à mixtes et à agrégats	10	20	20	60	20	60
MSa	Mésique Saprique à agrégats	10	20	0	30	60	90
Sm	Saprique à mixtes	0	10	60	100	0	40
Sma	Saprique à mixtes et à agrégats	0	10	30	60	30	60
Sa	Saprique à agrégats	0	10	0	40	60	100

Figure 53: Classification granulométrique des tourbes de la série des gazons de mousses et évolution pédologique de chaque stade décrit

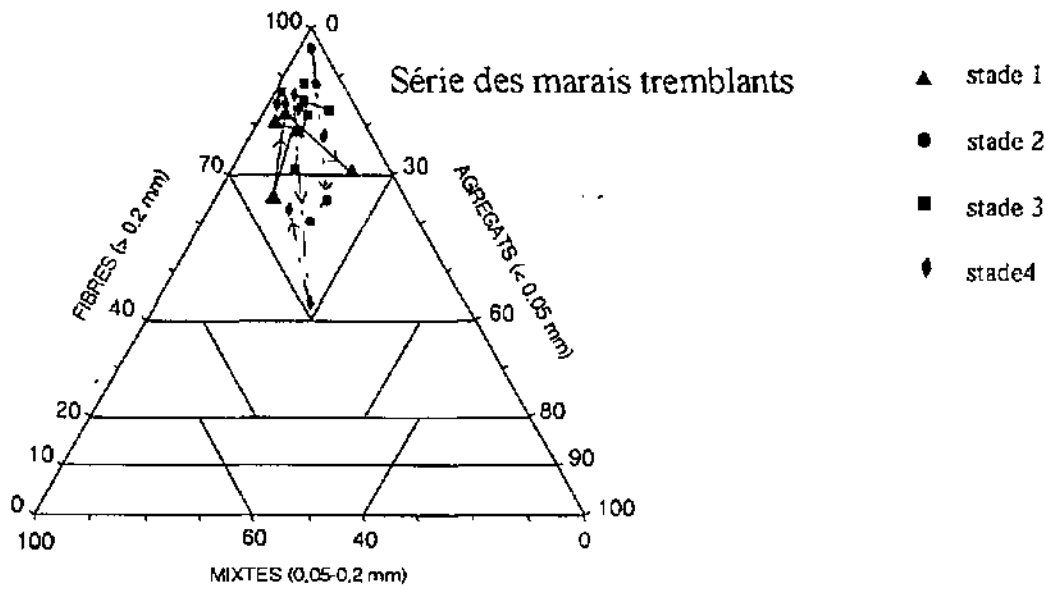
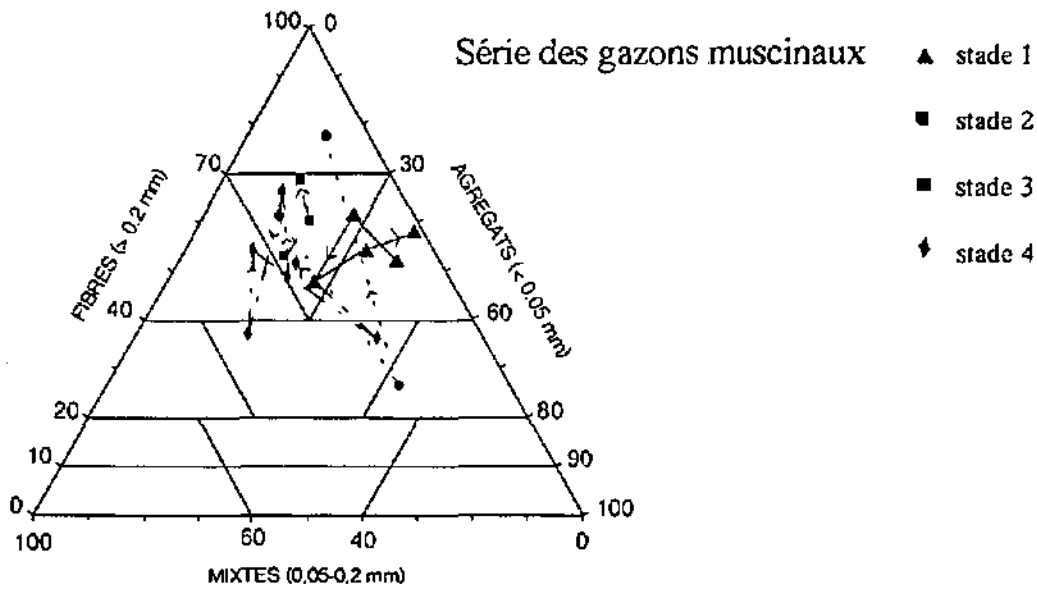


Figure 54: Classification granulométrique des tourbes de la série des marais tremblants et évolution pédologique de chaque stade décrit

4.4.2.2. Classification

La figure 51 permet de visualiser la position générale des domaines granulométriques de nos trois séries. Le domaine fibrique domine largement, avec toutes les cellules touchées. Il apparaît un décalage nette vers la droite, attestant la dominance des particules fines et des fibres au détriment des particules moyennes. Le domaine mésique est peu concerné. La positions des nuages confirme la faible proportion générale des particules mixtes. Ces résultats généraux se calquent parfaitement sur ceux présentés par GOBAT *et al* (1991), qui intègrent les résultats de GIUGNI (1991) qui a eu l'occasion de tester le triangle pour ses tourbes de bas-marais.

Au-delà des résultats généraux, les trois séries se différencient relativement peu. La série des touradons est la plus nettement décalée à droite du triangle et vers le bas. La forte décomposition des tourbes de La Chaux-d'Abel s'exprime plus par une **diminution marquée des fibres et d'avantage d'agrégats**. Par les racines, la proportion des fibres reste élevées, dictant l'appartenance générale aux domaines Fibrique et Mésique Fibrique. Son premier stade est bien isolé, dans la cellule *F*, attestant son originalité pédologique et son caractère Fibrique dominant. La figure 52 présente l'évolution des solums de chaque stade de cette série. Les échantillons Mésique Fibrique sont les horizons de la base des profils, sous l'influence du substrat minéral. Un seul échantillon (l'horizon de fond du stade 2) entre dans le domaine Mésique Saprique.

Les échantillons caractérisant les gazons muscinaux sont encore plus nettement placés dans le domaine Fibrique (figure 53). Cette série présente des caractères mixtes nettement plus marqués avec une répartition dominante dans la cellule *Fma*. Le premier stade montre une dégradation microstructurale plus poussée avec un décalage vers la cellule *Fa*. L'hétérogénéité du profil réapparaît ici avec une position relative de chaque horizon assez aléatoire au sein des deux cellules. Pour les autres stades, il y a par contre une nette différenciation des horizons dégradés, qui entrent, pour les plus marqués, dans le domaine Mésique Fibrique. Seul le stade 3 présente un bon regroupement des horizons analysés. Pour le stade 2, l'horizon fortement décomposé apparaît nettement tout comme son homologue identifié au stade 4. Pour ce dernier stade, la loupe de tourbe plus décomposée entourant les branches "fossiles" se place également dans la cellule *MFma*.

La série des marais tremblants, présentée à la figure 54, est totalement Fibrique avec, pour la plupart des échantillons, une position nette dans la cellule *F*. Il est intéressant de noter ici la position des tourbes à laïches, constituant l'horizon de fond des sols décrits. Ils sont placés dans la cellule *Fma* et indiquent clairement par là que la composition botanique influence nettement la décomposition physique du matériel. Une tourbe aussi ancienne devrait logiquement caractériser le domaine Mésique. La position des échantillons sur le triangle est dictée par la conservation de structures linéaires longues et solides dans la tourbe. Ces restes de tiges et de gaines foliaires maintiennent le taux de fibres haut malgré l'âge des dépôts. Les échantillons influencés par les zones de battement préférentiel de la nappe phréatique montrent la même position que les tourbes à laïches.

Cette classification montre que **la composition botanique joue un rôle primordial** pour séparer des échantillons groupés dans les mêmes cellules et dont l'histoire ou l'évolution sont fort différentes, ou pour expliquer la position de certains échantillons à position "surprenante". C'est particulièrement le cas pour les tourbes à forte présence de structures herbacées. Pour la série des touradons, la composition granulométrique apparaît comme très tranchée entre la présence de

fibres (racines, gaines, lambeaux de tiges) et des microagrégats. La classe des particules moyennes étant sous représentée. Visuellement, ces tourbes donnent une impression d'humification nettement plus grande. Comme le préconisent DOMERGUE-GRETER (1981) et LEVESQUE & DINEL (1982), la composition botanique est un complément de premier ordre pour la classification des tourbes.

Comme le montre l'interprétation des figures, la granulométrie des tourbes permet une analyse de l'évolution des horizons au sein des sols, en mettant en évidence les phénomènes pédogénétiques. Cette classification nous paraît particulièrement adaptée aux milieux secondaires, dont les tendances évolutives des différents horizons se marquent bien en étalant les nuages de points.

Il ressort ainsi nettement que la dégradation physique du matériel tourbeux des hauts-marais évolue plus par des modifications microstructurales que texturales.

4.4.3. Degré de décomposition des tourbes

4.4.3.1. Relations taux de fibres-indice pyro

Le degré de décomposition est un des principaux paramètres utilisés pour la classification des tourbes. Nous l'avons estimé par la mesure de l'indice de décomposition au pyrophosphate de sodium (= indice pyro) (KAILA, 1956). Cet indice entre dans la classification des tourbes pour affiner celle de SSSA (1974), basée uniquement sur le taux de fibres frottées. Ce sont LEVESQUE *et al.* (1980) qui ont proposé de considérer simultanément la valeur du taux de fibres frottées et de l'indice pyro.

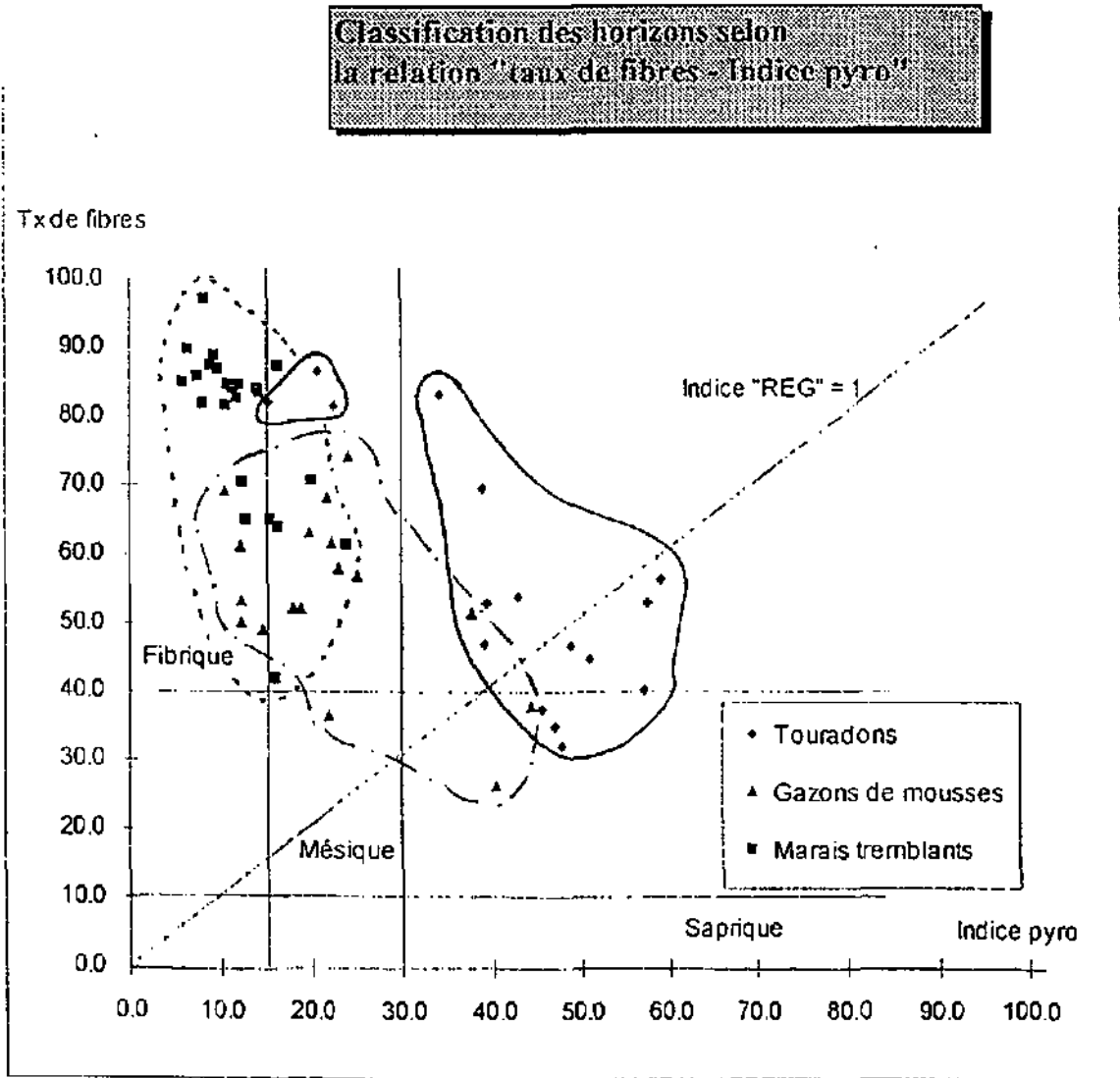
En travaillant sur une large panoplie de milieux et surtout de types de marais, LEVESQUE *et al.* (1980) ont montré une ordination de la répartition des échantillons sur le graphique curviligne, qui indique nettement l'évolution de la décomposition des tourbes. Pour les tourbes Fibriques, une forte séparation verticale, selon les domaines texturaux, apparaît. L'indice pyro reste < 10 et n'est pas significatif pour ce matériel. A partir du domaine Mésique, l'indice pyro devient explicatif alors que le taux de fibres reste lui assez stable. L'indice pyro est par contre primordial pour séparer les échantillons Sapriques, qui présentent une grande variabilité de décomposition chimique pour un taux de fibres très bas.

Pour les hauts-marais jurassiens secondaires (étudiés essentiellement au niveau de la surface du sol), les tourbes fibriques sont nettement dominantes. La figure 55 présente la position de nos 59 échantillons par leur relation "fibres-pyro". Très formellement, nous ne pouvons pas utiliser ce graphique pour classer nos tourbes car il est basé sur des valeurs de fibres frottées (LYNN *et al.* 1974). Cependant, comme nous le précisons au paragraphe 4.4.2.1., nous considérons nos résultats comme comparables si bien que la classification est valable.

L'impact des perturbations humaines se marque dès lors par une augmentation du degré de décomposition chimique des tourbes.

Cette décomposition est plus rapide que la modification de la composition granulométrique si bien que nombre d'échantillons restent fibriques et présentent une position décalée horizontalement sur le graphique. Même en tenant compte de la différence méthodologique lors du tamisage induisant une légère surévaluation du taux de fibres par rapport à la méthode classique des fibres frottées,

Figure 55: Classification des horizons selon les proportions "Fibres-Indice pyro"



nos tourbes restent essentiellement fibriques. Tout au plus, les échantillons les plus dégradés de la série des touradons (stades 2 à 4 de La Chau-d'Abel) entreraient plus franchement dans la catégorie des tourbes mésiques.

Nos échantillons reflètent parfaitement l'évolution secondaire des tourbes jurassiennes déjà été mise en évidence par GOBAT & PORTAL (1985), GOBAT *et al.* (1986), PARIAT (1988) et AEBY (1990). Elle confirme nos considérations sur la classification granulométrique qui indiquait une modification microstructurale plus importante que texturale. Il n'est dès lors pas étonnant que l'indice pyro reflète l'évolution granulométrique. Les échantillons analysés par GROSVERNIER (1996) pour les expériences menées en parallèle confirment l'évolution rapide de la décomposition chimique et ce, aussi bien pour les surfaces de tourbe nue que pour les sols transformés en prairies agricoles intensives.

La figure 55 illustre également la position des échantillons par rapport à l'indice de régénéralité défini par nos propres recherches (GOBAT *et al.* 1986). A l'époque, sur la base de 159 échantillons, couvrant l'ensemble des types de milieux des hauts-marais jurassiens, un indice a été proposé afin de définir un seuil qualitatif à partir duquel une tourbe jugée trop dégradée n'offre plus les conditions physico-chimiques nécessaires et suffisantes pour garantir une régénéralion. Cet indice est calculé par le quotient taux de fibres/indice pyro (TF/IP). Le seuil a été fixé à 1.

Actuellement, nous constatons que 10 échantillons sont placés sous le seuil de 1. Outre l'horizon particulièrement dégradé du stade 2 des gazons muscinaux, il s'agit des horizons les plus décomposés des stades 2, 3 et 4 de la série des touradons. A l'évidence, cet indice doit être remis en question puisqu'une forte régénéralion est constatée et que les échantillons concernés sont en surface, donc directement en contact avec les sphaignes qui se réimplantent. Plus qu'une modification du seuil de l'indice, nous proposons ici de remettre en question sa signification. Nous considérons en effet comme probable que l'analyse détaillée de nouveaux sites en régénéralion confirmera le potentiel de régénéralion sur des tourbes encore nettement plus dégradées.

4.4.3.2. Rapport Ca/Mg

Le rapport Ca/Mg a été proposé comme indicateur des limites d'influences de l'eau minérotrophe, et, par conséquent, comme caractère de séparation entre tourbières ombrotrophes et minérotrophes (MATTSON *et al.* 1944). MATTSON & KOUTLER-ANDERSON (1954, *in* CLYMO 1983) propose un rapport de 1:1 pour cette limite. CHAPMAN (1964), sur la base de résultats se situant entre 0,5 et 3, considère que ce rapport est une bonne base de classification. LEVESQUE & MILLETTE (1977) ont calculé des rapports beaucoup plus élevés (entre 8 et 25). Bien que considérant une formation minérotrophe pour les tourbières étudiées, les conditions actuelles proches de la surface sont jugées nettement ombrotrophes ce qui fait dire aux auteurs que le rapport proposé ne s'applique certainement pas aux tourbières de l'Est canadien. WAUGHMAN (1980) ainsi que FRANCEZ (1990) mettent également en évidence des rapports supérieurs à 1:1.

CHAPMAN (1964) calcule ses rapports sur la base d'extraction à l'acide acétique (cations échangeables). LEVESQUE & MILLETTE (1977) ont calculé les leurs sur les valeurs des cations totaux en considérant que les rapports calculés entre les deux types d'extractions coïncidaient et donnaient les mêmes ordres de grandeur. FRANCEZ (1990) calcule également son rapport sur la base des cations totaux. Pour notre part, nous avons calculé ces rapports à partir des valeurs des cations

totaux (cations mobilisables). Formellement, ils sont donc plus comparables aux données canadiennes et françaises, qu'à celles de CHAPMAN (1964).

Les rapports calculés varient de 0.1 à 22.8, avec une très grande majorité qui se situe entre 0.6 et 5, comme le montrent les tableaux 10 à 21. Nous obtenons donc des valeurs un peu plus hautes que celles de CHAPMAN (1964) pour les hauts-marais jurassiens. Elles sont par contre parfaitement similaires à celles de WAUGHMAN (1980) et de FRANCEZ (1990). **Sur la base des cations totaux, nous estimons que le rapport de 1:1 n'est pas une limite précise entre fonctionnement ombrotrophe et minérotrophe pour les hauts-marais jurassiens.** De plus, dans les marais secondaires, sous l'influence du drainage ou d'hétérogénéités dans les horizons pédologiques, les valeurs peuvent varier localement sous l'influence de lixiviation ou d'accumulation. Les valeurs calculées par GROSVERNIER (1996) pour les 50 premiers cm de surface d'un haut-marais primaire (*Sphagnum magellanicum*) donnent des rapports de 2.7 à 4.3, avec une augmentation vers la profondeur. Pour les tourbes transformées en terrains agricoles, l'influence des engrais se fait sentir nettement sur 25 cm avec des rapports Ca/Mg de 8.7 et 12.7. Entre 25 et 50 cm, le rapport retombe à 4.5-4.9.

Ces valeurs nous font proposer un seuil de 5 entre fonctionnement ombrotrophe et minérotrophe.

Cette valeur de 5 est d'ailleurs la même que celle mise en évidence par FRANCEZ (1990) pour le Massif Central. La différence significative entre ces résultats (ainsi que ceux de LEVESQUE & MILLETTE (1977) et ceux des auteurs allemands ou scandinaves peut s'expliquer par le type de régime pluviométrique et l'éloignement de nos tourbières par rapport à l'océan. WAUGHMAN (1980) indique une nette relation entre la teneur en Mg dans les précipitations et la proximité des réservoirs d'eau salée.

Pour nos séries, les résultats confirment les modalités de fonctionnement entre les séries "terrestres" ombrotrophes, avec des rapports Ca/Mg entre 0.1 et 5 (tab. 10 à 17), et la série des marais tremblants pour laquelle le rapport Ca/Mg permet de montrer les limites de l'influence des écoulements minérotrophes pour chaque stade. (tab. 18 à 21). Vu l'importance et la qualité des écoulements latéraux à travers la tourbière de Bellelay, il est probable que l'augmentation de Ca soit imputable à la circulation hydrique latérale. Le stade 3 de la série des touradons présente les valeurs les plus grandes entre 10 et 45 cm de profondeur, attestant une accumulation de Ca dans les horizons placés au contact du substrat minéral. Le phénomène est également identifié pour les stade 2 et 4 de cette série mais avec une proportion moindre. Il faut de plus noter ici que la marne totalement décalcifiée présente un rapport très bas, ce qui nous fait dire que ce dernier est comparable entre les tourbes, mais non avec le substrat minéral lui-même, et que la tourbe semble posée sur la marne sans lien chimique important. Les minces horizons dégradés de la série des gazons muscinaux indiquent une lixiviation importante de Ca ce qui abaisse fortement la valeur du rapport (0.4). Enfin, pour les tourbes des marais tremblants, ce rapport est très intéressant pour démontrer la formation minérotrophe de la tourbe à laïche du fond, qui présente un rapport de 6 à 7, alors que les horizons de tourbe jeune varient entre 2.6 et 5. La limite proposée à 5 permet bien ici de placer la limite stratigraphique de l'influence minérotrophe. Pour le stade 4, le fonctionnement ombrotrophe de la butte se marque légèrement avec des valeurs Ca/Mg légèrement inférieures à celles des tourbes du replat qui ont un fonctionnement minérotrophe dès 15 cm de profondeur, avec une augmentation marquée pour la tourbe à laïches.

4.4.4. Le rapport atomique de H/C

La caractérisation de la matière organique, en particulier son degré d'humification, est basée sur la détermination des types de structures moléculaires et sur le rapport quantitatif relatif des constituants solubles de l'humus: les acides humiques (AH) et les acides fulviques (AF) (SCHNITZER, 1978, 1982).

Pour les tourbes, les variations des composés humiques et fulviques ont fait l'objet d'approches diverses, dont en particulier:

- Dosage et proportion relative des AH et des AF pour caractériser le degré d'humification du matériel (DOMERGUE-GRETER 1981, GOBAT & PORTAL 1985).
- Déterminisme des composés chimiques des AH et des AF afin de comprendre les relations entre humification et capacité de rétention en eau en fonction des structures moléculaires (FLAIG 1986, SCHNITZER 1986).
- Evolution des types de structures moléculaires composant les AH et les AF à travers les profils de bas-marais et de hauts-marais (ANDERSON & HEPBURN, 1986).
- Mesure de la concentration de certains produits de dégradation (acides phénoliques) comme indicateurs du degré d'humification des tourbes (SCHNITZER & LEVESQUE, 1979).

Pour les sols tourbeux, qui accumulent d'énormes quantités de matière organique non décomposée, la compréhension et la mesure du degré d'humification réel ne sont pas aisées. Pour les sols organiques, ANDREUX (1978, *in* GOBAT & PORTAL, 1985) propose d'utiliser le rapport atomique de H/C comme indice d'aromaticité, c'est-à-dire comme indicateur des proportions entre les composés à tendance aliphatique (forte quantité d'atomes d'hydrogène dans les molécules par rapport aux atomes de carbone) et ceux à tendance aromatique (proportion H-C plus basse), par analogie avec la caractérisation des humus forestiers.

Toutes les références consultées expriment des valeurs basées sur des dosages d'extractions alcalines au NaOH ou au $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ et se limitent donc à la fraction soluble de l'humus (AH et AF). Pour notre part, les dosages élémentaires effectués sur l'hydrogène et le carbone concernent le matériel total, à partir de tourbe broyée et séchée. Les résultats obtenus pour l'indice H/C atomique ne sont donc pas comparables à ceux de la littérature car ils donnent des valeurs trop hautes, par le dosage de la matière organique libre présente en très forte proportion dans les échantillons tourbeux. RAFIDISON (1982) estime la proportion de matière organique libre à 52% pour les feuilles d'arbres brunes fraîchement tombées au sol et à 37% pour l'horizon A1 après l'intense travail des vers de terre. Dès lors le seuil de 1.25 pour H/C proposé par ANDREUX (1978, *in* GOBAT & PORTAL 1985) pour séparer les dominances entre composés aliphatiques et aromatiques ne peut pas être pris en considération ici. Comme le montrent les résultats exposés aux tableaux 10 à 21, un seul horizon présente une valeur inférieure à ce seuil.

Néanmoins, cet indice permet une comparaison entre les différents horizons et stades de nos trois séries par comparaison directe des valeurs entre elles et avec les autres paramètres mesurés. Il assure une confrontation avec les résultats des paramètres caractérisant l'état de décomposition (pyro, cendres, CEC, fibres) et la composition botanique du matériel, dont les valeurs apparaissent parfois contradictoires entre elles.

Une tourbe jeune, au matériel très peu décomposé doit présenter un indice élevé, témoignant la tendance aliphatique de ses constituants et des produits issus de la première décomposition du

Tableau 23: Correlations simples. Tous les paramètres et tous les horizons

Tableau 23: Correlations simples entre tous les paramètres et pour tous les horizons
(P=0.01, limite de l'indice r=0.5)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	29	31	32							
pH eau	pH KCl	% humidité	%2000	%200	150	Tx fibre	30	Pyro	CEC	scandres	Ca (s)	Mg (s)	K (s)	Na (s)	C (s)	H (s)	H/C	C/N	por. tot.	por. 20um	por. 200um	ret. eau	densité	aphaig	herbes	bois	agrés									
1	0.79																																			
	1																																			
		1																																		
			1																																	
				1																																
					1																															
						1																														
							1																													
								1																												
									1																											
										1																										
											1																									
												1																								
													1																							
														1																						
															1																					
																1																				
																	1																			
																		1																		
																			1																	
																				1																
																					1															
																						1														
																							1													
																								1												
																									1											
																										1										
																											1									
																												1								
																													1							
																														1						
																															1					
																																1				
																																	1			
																																		1		
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	
																																			1	

matériel végétal. La proportion de matière organique libre y est particulièrement forte, avec une quantité de cellulose importante. Par les conditions anaérobies, l'acidité marquée et le degré d'hygrométrie élevé qui caractérisent les milieux tourbeux, la décomposition de la matière organique est ralentie. Il y a consommation de la cellulose avec dégagement de méthane et de dioxyde de carbone et accumulation de lignine, composé stable et difficilement attaqué chimiquement dans ces conditions. Les tourbes climaciques ont donc une dominance aromatique avec un indice H/C bas (GOBAT & PORTAL, 1985). FLAIG (1986) explique les processus de dégradation lente de la lignine, son oxydation et la constitution de petits polymères aromatiques.

Outre l'évolution temporelle naturelle, les tourbes sont caractérisées par des modifications plus ou moins rapides et importantes en liaison avec les conditions écologiques stationnelles (qualité et niveau hydrique p. ex.), la composition botanique initiale ou les impacts humains. Ainsi, une forte proportion de bois va provoquer une augmentation de la tendance aromatique du matériel, tout comme la présence de *Calluna vulgaris* (liée aux défrichages) par la production de composés polyphénoliques par cette espèce (GOBAT & PORTAL, 1985).

L'analyse de l'ensemble de nos résultats ne permet pas de mettre en évidence de corrélation significative entre l'indice H/C atomique et les autres paramètres mesurés, si ce n'est avec le taux de cendres ($r=0.59$, $P=1\%$). Considéré pour chaque série, l'indice montre par contre des différences de corrélation intéressantes.

Pour la série des touradons, à la tourbe principalement peu épaisse, ancienne et asséchée, la corrélation est bonne avec le taux de cendres ($r=0.75$, $P=1\%$), la présence de sodium ($r=0.6$, $P=1\%$) et la présence de ligneux dans le matériel fibreux ($r=-0.6$, $P=1\%$). Une corrélation négative de -0.44 ($P=1\%$) est mise en évidence avec le taux d'azote.

Pour la série des gazons de mousses, la meilleure corrélation est calculée avec le rapport C/N ($r=0.56$, $P=1\%$). Elle est négative et faible avec le taux de cendres.

Pour la série des marais tremblants, la corrélation la plus significative se marque avec la CEC ($r=0.57$, $P=1\%$), puis avec l'azote et le rapport C/N (respectivement -0.4 et 0.44 , $P=1\%$). Pour cette série la composition botanique ou les cendres ne sont pas significatives, ce qui paraît normal vu ses caractéristiques pédologiques générales. Par contre, le fonctionnement chimique minérotrophe de la tourbière se marque ici.

Ces résultats indiquent que l'évolution chimique de la matière organique est liée fortement aux conditions stationnelles et que l'indice H/C reflète bien une tendance, celle-ci étant l'expression de divers facteurs exprimés par des groupes de paramètres complémentaires.

L'amplitude de l'indice est assez faible pour les échantillons analysés (1.21 à 1.67). Pour un profil, et plus encore au sein d'une série, les variations peuvent être importantes. Dès lors, pour tester le degré d'aromaticité des échantillons et tenter de montrer les relations avec l'ensemble des paramètres analysés, nous avons placé les valeurs de l'indice sur les résultats des différentes analyses en composantes principales effectuées (c.f. chap. 4.5 ci-après et figures 57, 58 et 59). L'ACP globale permet de grouper les échantillons en 3 ensembles distincts (fig. 57). Un gradient d'aromaticité se marque nettement sur la base de la moyenne de l'indice, calculée avec les échantillons de chaque groupe. Le groupe I présente une valeur moyenne de 1.51. Il rassemble les échantillons les plus aliphatiques. Ils sont en liaisons avec des taux de fibres élevés, des pyro bas et une

Tableau 24: Correlations simples. Tous les paramètres et tous les horizons série des touradons

Tableau 24: Corrélations simples entre tous les paramètres pour la série des touradons (P=0.01, limite de l'indice r=0.5)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
pH eau	1																												
PR KCl	0.97	1																											
% humidité			1																										
1200				1																									
150					1																								
Tx fibre						1																							
CEC							1																						
PYRO								1																					
leendres									1																				
Mg (t)										1																			
K (t)											1																		
Ha (t)												1																	
H (t)													1																
C (t)														1															
H/C															1														
por. tot																1													
C/N																	1												
por. 200um																		1											
ret eau																			1										
aphaigms																				1									
densité																					1								
mousse																						1							
herbes																							1						
ligneux																								1					
bois																									1				
égré																										1			
29																											1		

dominance de sphaignes au détriment du bois et des ligneux. A l'inverse, le groupe III a une valeur de 1.47 pour H/C. Il montre la tendance aromatique des échantillons de ce groupe. Le groupe II, central a également un indice de 1.47 mais avec une variabilité extrême des valeurs. Ce fait n'est pas surprenant puisque ce groupe rassemble principalement les échantillons aux caractéristiques pédologiques influencées fortement par des contraintes humaines. L'axe 1 de la figure 58 reproduit également le gradient croissant d'aromaticité de la droite vers la gauche.

Considéré par série, il est intéressant de noter que pour la série des gazons de mousses, le rapport H/C atomique permet une analyse intéressante en relation avec les atteintes humaines liées au drainage. Conformément à l'hypothèse formulée lors de la présentation du profil du premier stade (c.f. chap. 4.2.4.6.), la tourbe montre une dominance aromatique, en relation avec une CEC très faible, liée à la structure moléculaire extrêmement stable de l'humine. L'hypothèse d'une **décomposition de la tourbe avec accumulation d'humine résiduelle tend donc à être confirmée**. Au stade 2, la forte proportion de mousses et de sphaignes dans la tourbe de surface explique le caractère aliphatique de cet horizon, que le faible pyro et la forte CEC confirment. L'horizon dégradé présente un indice moyennement faible, en comparaison avec la basse valeur de la CEC et le pyro nettement plus haut que pour l'horizon supérieur. Malgré cet état de décomposition marqué, l'indice d'aromaticité ne suit pas dans les mêmes proportions. Le stade 3 confirme ce décalage avec un horizon altéré nettement à tendance aliphatique.

Y a-t-il une relation entre la valeur des indices et la présence de *Polytrichum strictum* (lixiviation de produits et accumulation dans l'horizon altéré) ou faut-il considérer que l'activité bactérienne aérobie, rendue possible par les battements de nappe, libère des composés aliphatiques dans cet horizon? Une recherche spécifique est nécessaire pour répondre à ces questions.

Au stade 4, l'horizon d'accumulation de sphaignes montre un caractère aliphatique tranché par rapport à la tendance du profil, marqué par la présence de bois et des vacciniées vivantes en surface. A noter ici, comme pour les tourbes anciennes du fond des fosses de la série des marais tremblants, que le caractère aromatique de la tourbe de fond est particulièrement prononcé.

Pour la série des touradons, les valeurs obtenues posent de nombreux problèmes d'interprétation. Les stades 1 et 2 présentent un indice à tendance aliphatique en surface, alors que la tourbe apparaît comme fortement dégradée eu égard aux valeurs des autres paramètres. En profondeur, l'ancienne tourbe du stade 1 est à nouveau très aromatique comme pour les autres séries alors que pour le stade 2 l'aromaticité augmente également, en relation avec une présence accrue de bois. La question de l'activité microbienne aérobie en surface et ses conséquences sur la dégradation de la matière organique reprend ici tout son sens. Pour le stade 3, le caractère aliphatique domine tout le profil. Pour ces trois stades, la valeur haute de l'indice H/C est en relation avec une CEC également haute, malgré un pyro élevé. Au stade 4 par contre, le caractère aliphatique le plus marqué concerne l'horizon au pyro le plus bas, avec une CEC basse. La meilleure corrélation est décelable entre les fortes présences de résidus cendreux et le caractère aliphatique, ce qui semble fortement contradictoire.

BARRIUSO (1982), dans son travail méthodologique, indique que les AH présentent un taux de cendres plus élevé que les AF. Pour nos sols fortement cendreux, nous pouvons supposer que la proportion d'AH est plus forte que celle des AF. BARRIUSO indique que les AH qu'il a analysés présentent un caractère aliphatique marqué et que ce caractère est renforcé par l'extraction alcaline

Tableau 25: Correlations simples. Tous les paramètres et tous les horizons série des gazons de mousses

Tableau 25: Correlations simples entre tous les paramètres pour la série des gazons de mousses (P=0.01, limite de l'indice r=0.5)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25	26	27	28	29			
	pH eau		pH KCl		% humidité		% 2000	% 1200	% 150	Tx fibre	CBC	te au feu	Mq (%)	K (%)	Na (%)	C (%)	H (%)	H/C	por. tot.	por. 20 um	por. 200um	ret. eau	densité	ligneux	bois	agrég.					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25	26	27	28	29			
pH eau	1	0.93	0.65																												
pH KCl		1	0.65																												
% humidité			1	0.50																											
% 2000				1	-0.59	-0.71																									
% 1200					1																										
% 150						1																									
Tx fibre							1																								
CBC								1																							
te au feu									1																						
Mq (%)										1																					
K (%)											1																				
Na (%)												1																			
C (%)													1																		
H (%)														1																	
H/C															1																
por. tot.																				1											
por. 20 um																					1										
por. 200um																						1									
ret. eau																							1								
densité																								1							
ligneux																									1						
bois																										1					
agrég.																											1				

la plus puissante (pH de 12). Il cite les résultats de KONONOVA (1966, *in* BARRIUSO, 1982) qui a obtenu des caractères aliphatiques encore plus prononcés pour les AH. Dès lors, en analysant le matériel total, la relation "aliphatique-taux de cendres élevé" est peut-être interprétable.

Pour les marais tremblants, la relation avec la proportion d'azote est bien marquée pour les stades 1 et 2. Au stade 1, le caractère aromatique est directement corrélé avec la CEC basse. Ces deux stades présentent un peu de bois à travers tout le profil et un indice d'aromaticité plus bas que le stade 3 qui n'a pas de bois. Au stade 4 par contre, le caractère aromatique ressort également mais avec une CEC haute, ce qui est contradictoire par rapport au premier stade. La présence des chaméphytes vivantes et du bois dans la tourbe en relativement forte proportion permet d'expliquer cette tendance. A noter enfin que tous les échantillons de la tourbe à lâches de profondeur ont un indice de 1.42 à 1.43, ce qui dénote autant la stabilité évolutive de cette tourbe que son aromati-cité importante.

4.4.5. Corrélations linéaires simples entre paramètres

Nous avons calculé les corrélations linéaires simples entre tous les paramètres deux à deux, en tenant compte, dans un premier temps, des résultats globaux (tab. 23) puis en recalculant par série afin d'estimer les particularités de chacune (tab. 24 à 26). Vu les spécificités bien tranchées des trois séries, il n'est pas surprenant d'obtenir des tableaux assez différents, avec parfois un seuil de signification important pour une série alors qu'il devient insignifiant sur l'ensemble des échantillons. La série des touradons (tab. 24) possède un grand nombre de corrélations au-dessus de $r = 0,5$ pour un seuil de $P = 1\%$, alors que, comparativement, la série des gazons muscinaux présente de moins bonnes relations entre les paramètres mesurés (tab. 25)

Pour l'ensemble des échantillons et des paramètres, nos corrélations confirment celles calculées en 1986 (GOBAT *et al.*) pour les tourbes jurassiennes. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence (tab. 23):

1° Taux de fibres - Indice pyro : -0.57 (59 échantillons)

Ce résultat n'est pas valable pour les deux séries "terrestres", dont l'indice de corrélation est insignifiant. Comparé aux données de LEVESQUE *et al.* (1981), notre résultat indique que cette corrélation est bonne pour les sols tourbeux qui présentent une évolution pédologique dictée par les conditions intrinsèques du milieu. Pour les sols évoluant sous l'influence marquée des travaux humains, il y a décalage entre les évolutions physiques et chimiques dans le sol (cf. ci-dessus). La panoplie importante des milieux testés dans GOBAT *et al.* (1986) ne permet pas de mettre en évidence aussi nettement cette différenciation.

Taux d'humidité et taux de cendres : -0.80 (59 échantillons)

Taux d'humidité et taux de fibres : 0.64 (59 échantillons)

Pour ces deux corrélations, la série des touradons est la seule à fournir une valeur d'indice $> 0,5$. Les résultats de l'hydrodynamique démontrent la spécificité de cette série face au facteur hydrique (c.f. chapitre 5)

Densité app. et rétention en eau : -0.94 (36 échantillons)

Uniquement testés pour les séries "terrestres", ces paramètres confirment la relation étroite entre la compaction d'un sol et l'eau qu'il est capable de maintenir dans son volume vide. Les relations sont équivalentes avec les macro- et mésoporosités.

Tableau 26: Correlations simples. Tous les paramètres et tous les horizons série des marais tremblants

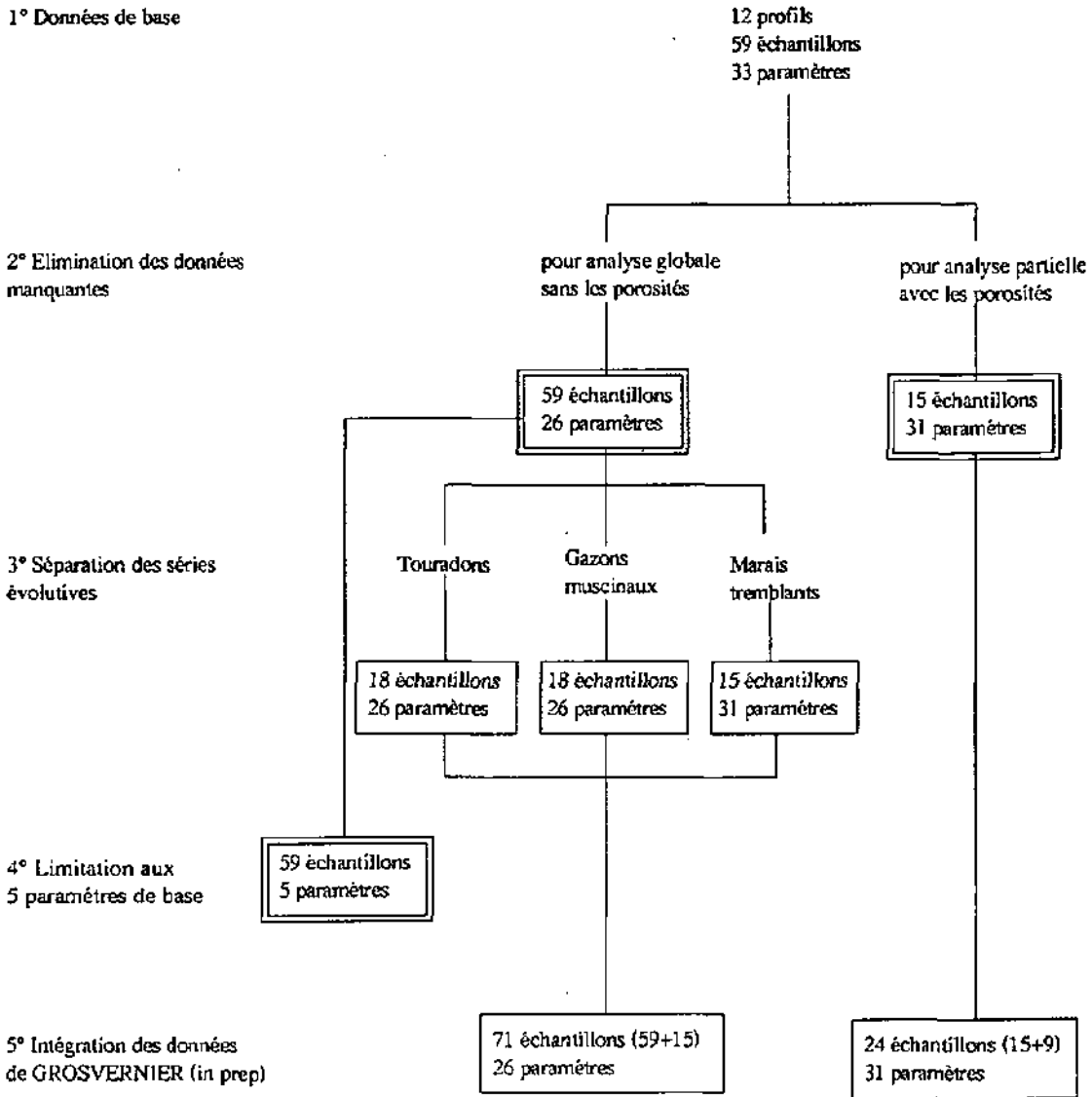
Tableau 26: Correlations simples entre tous les paramètres pour la série des marais tremblants (P=0.01, limite de l'indice r=0.5)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27									
	pH eau	pH KCl	% humidité	Σ2000	Σ150	Tx fibre	Pyro	CEC	scandres	Ca	Mg	Na	K	H (%)	C (%)	H/C	C/N	sphaigne	mousse	herbes	ligneux	bois	agrég-													
pH eau	1																																			
pH KCl		1																																		
% humidité			1																																	
Σ2000				1																																
Σ150					1																															
Tx fibre						1																														
Pyro							1																													
CEC								1																												
scandres									1																											
perte au feu										1																										
Ca											1																									
Mg												1																								
Na													1																							
K														1																						
H (%)															1																					
C (%)																1																				
H/C																	1																			
C/N																		1																		
sphaigne																			1																	
mousse																				1																
herbes																					1															
ligneux																						1														
bois																								1												
agrég-																										1										

- 2° De bonnes corrélations entre les cations eux-mêmes (sauf Ca). Ce résultat est parfaitement comparable à celui de GOBAT (1984). Ces résultats sont principalement influencés par la série des touradons.
- 3° De bonnes corrélations entre les fractions granulométriques elles-mêmes. Ce résultat est principalement dû à la série des marais tremblants et, secondairement, à celle des gazons muscinaux.
- 4° Pour la composition botanique, il faut relever la présence de corrélations significatives pour les taux de sphaignes et d'agrégats, avec de nombreux autres paramètres, alors que les autres composantes végétales ne révèlent rien. Les significations sont inversées, ce qui traduit bien l'opposition forte de caractérisation des sols entre tourbe à sphaignes (très jeune) et tourbe à agrégats (fortement humifiée). Considérée séparément, chaque série présente des caractéristiques face à la composition botanique. Les 6 fractions différenciées sont fortement corrélées aux autres paramètres et entre elles pour la série des touradons (tab. 24). Les corrélations entre ces paramètres sont très faibles pour la série des gazons de mousses (tab. 25); le taux d'agrégats est corrélé aux paramètres de compaction et de porosités du sol. Pour ces deux séries, le rapport C/N est bien corrélé à la présence de ligneux, avec une valeur nettement plus forte pour la série des touradons (0.94 contre 0.52 pour la série des gazons de mousses).
- 5° Selon LAINE (1984) il y a une relation directe entre la densité de la tourbe et le degré d'humification de celle-ci. MALMER & HOLM (1984) indiquent également cette relation en exprimant le degré d'humification par l'indice von Post. Ils considèrent de plus que le rapport C/N est un bon indicateur de l'humification, et plus particulièrement la teneur en azote, alors que le carbone ne varie pas significativement le long des profils décrits. FRANCEZ (1990) trouve une corrélation simple entre densité apparente et C/N ($r = -0.83$) pour la tourbière drainée uniquement. Il ne met en évidence aucune corrélation pour son site témoin primaire.

Pour nos propres échantillons, si l'on considère l'ensemble des horizons (tab. 23), la corrélation est de $r = -0.64$ entre densité apparente et C/N. En considérant les valeurs séparément pour les séries terrestres sous l'influence du drainage, la valeur de r est de -0.77 pour la série des gazons de mousses (tab. 25) et de -0.54 pour la série des touradons (tab. 24), ce qui confirme assez bien les résultats de FRANCEZ (1990). Une corrélation existe également entre la densité apparente et la teneur en azote, conformément aux résultats de MALMER & HOLM (1984), avec une valeur de $r = 0.64$ pour l'ensemble des horizons. Il est intéressant de noter que l'indice pyro (indicateur du degré d'humification) ne présente pas de corrélation significative avec la densité apparente, sauf pour les tourbes de la série des touradons dont la corrélation est de $r = 0.84$. Pour la série des gazons de mousses, les valeurs de l'indice pyro sont très variables pour des valeurs de densité apparente assez proches ce qui empêche ici une corrélation linéaire significative entre ces deux paramètres. Pour l'ensemble des horizons testés, l'évolution différente entre C et N se marque par une corrélation "C/N-frac. >200 μ m" positive de 0.63, alors que la corrélation "C/N-frac. 0 à 50 μ m" est négative avec -0.52 . Ces valeurs indiquent un enrichissement des fractions fines en azote. Significatif uniquement pour la série des touradons, la relation entre C/N et humification, signalée par MALMER & HOLM (1984) est donnée ici par l'indice de corrélation entre C/N et indice pyro qui est de -0.7 .

Figure 56: Déroulement des analyses multivariées (ACP) sur les sols



A chaque étape, une ACP est effectuée



Etapes significatives figurées graphiquement

- 6° Une corrélation significative est également mise en évidence entre le taux de cendres et la mésoporosité moyenne (valeur de $r = -0,75$) pour l'ensemble des horizons testés. Ce résultat est parfaitement comparable à celui trouvé par KUNTZE (1965) entre ces paramètres. En tenant compte des macropores, la corrélation est encore significative bien qu'un peu plus faible ($r = -0,6$)

4.5. ANALYSES MULTIVARIABLES DES SOLS

4.5.1. Introduction

La méthode et le choix des programmes informatiques sont présentés au chapitre 1.7.

L'analyse en composantes principales (ACP), utilisée avec des paramètres édaphiques (=variables) permet une comparaison des échantillons analysés (=relevés) en terme de proximité de points. L'évaluation des relations "paramètres-échantillons" se fait en fonction des proximités angulaires des variables (vectorisées) alors que la longueur relative de chaque vecteur défini traduit la signification du vecteur projeté. Tous les points sont répartis par calcul selon leur degré de "parenté" dans un espace multidimensionnel. L'interprétation des résultats est possible grâce à la projection des points sur un plan bidimensionnel formé des deux axes qui permettent la projection la plus significative (plan 1-2). Le premier axe est défini comme celui qui explique le mieux la matrice de dispersion des points. Sur l'image du plan de projection, l'interprétation se base sur les critères suivants:

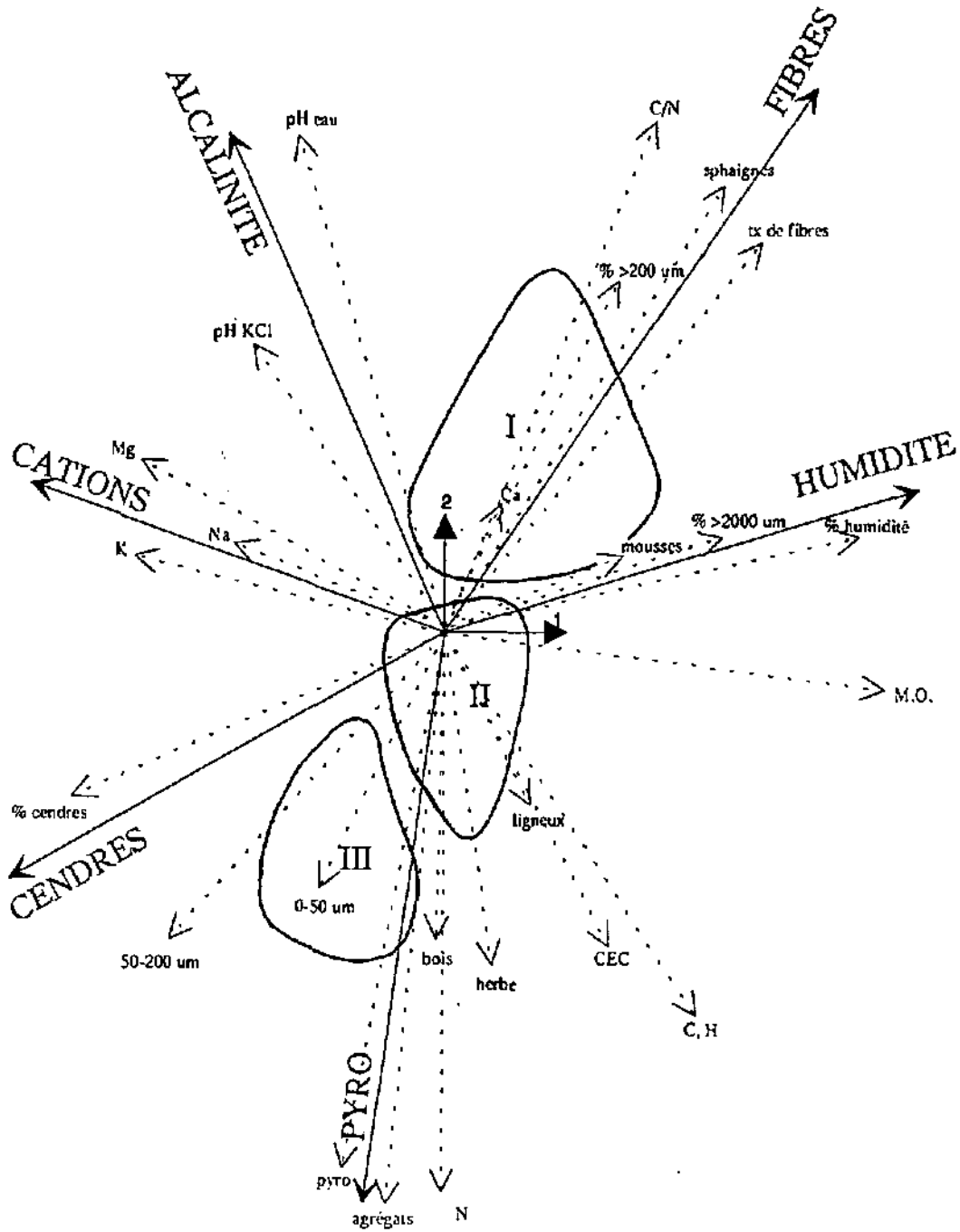
- deux vecteurs dont l'angle vaut 90° sont indépendants.
- la corrélation positive entre vecteurs augmente proportionnellement à la fermeture de l'angle qu'ils forment.
- La signification des échantillons et des paramètres augmente avec l'éloignement du centre défini par les deux axes de projection.

Les axes principaux successifs correspondent à des fractions toujours plus petites de la variance totale. L'information projetée est donc significative jusqu'à un certain seuil qu'il est possible de déterminer. Selon le modèle dit "du baton brisé" (LEGENDRE & LEGENDRE, 1984, t. 1), les variances associées aux valeurs propres successives des différentes analyses que nous avons menées permettent une interprétation significative des trois premiers axes pour chaque traitement.

Considérant nos échantillons (la non-constance des paramètres analysés ainsi que la forte différenciation des types de milieux étudiés), nous avons procédé à de nombreuses ACP partielles dans le but de cerner au mieux la variabilité des groupes formés et les relations "paramètres-échantillons". La figure 56 résume le cheminement analytique retenu. Comme le montre cette figure, outre les analyses multivariées menées sur nos échantillons, nous avons ajouté les valeurs des 5 profils décrits par GROSVERNIER (1996) car ils permettent une diversification des types de milieux rencontrés, en particulier par la présence d'un *Sphagnion magellanicum* primaire et de tourbe transformée en terrain agricole intensif. Comme nous l'avons déjà signalé lors des classifications physico-chimiques simples, les propriétés de ces échantillons ne se différencient pas suffisamment de celles de nos séries pour modifier un temps soit peu les résultats des ACP. Nous ne figurerons donc pas ici de projections qui intègrent ces données externes. Toutefois, s'il y a lieu, nous discuterons des analogies et des différences dans le texte.

Figure 57: ACP globale des échantillons des sols (59) avec 26 paramètres

plan 1-2 avec 32,8% et 22,9% = 55,7% de représentativité



Fondamentalement, trois types de traitement ont été retenus

- 1° L'ACP globale fournit la projection la plus significative en permettant l'interprétation des 59 échantillons. Pour les paramètres, vu l'impossibilité mathématique de prendre en considération des valeurs manquantes, nous n'avons pu ici conserver que les paramètres communs (26). Suivant le même choix que GIUGNI (1991), nous considérons les horizons comme indépendants et une extrapolation des valeurs manquantes par régression comme non significative. Dès lors, les mesures de porosité, capacité de rétention en eau et densité apparente ont été supprimées.
- 2° GOBAT *et al.* (1986) ont qualifié les sols d'une large panoplie de milieux tourbeux jurassiens en effectuant une ACP basée sur 5 paramètres de base (pH, taux d'humidité, taux de fibres, indice pyro, taux de cendres). Nous avons également ici effectué une ACP partielle en ne retenant que ces 5 paramètres dans le but d'estimer leur "poids" dans l'interprétation des résultats, et d'obtenir une bonne comparaison avec les résultats de 1986.
- 3° Une ACP partielle a été menée en sélectionnant les échantillons pour lesquels les paramètres de porosité, de capacité de rétention en eau et de densité apparente sont mesurés. Ils sont ajoutés aux autres paramètres (total de 31). Cette ACP concerne 15 échantillons et est limitée aux deux séries "terrestres".

4.5.2. L'ACP globale

L'ACP globale est illustrée sur la figure 57. Nous pouvons différencier trois groupes d'échantillons, directement influencés par la position relative des différents paramètres mesurés.

Ceux-ci se groupent en 6 faisceaux distincts pour lesquels nous avons défini et nommé un vecteur principal. Outre la mise en évidence des cations, groupés en faisceau serré à l'exception du Ca, les autres vecteurs correspondent aux cinq paramètres classiques. Ainsi, le vecteur "humidité" est proche du vecteur "fibres", attestant bien la complémentarité de ces deux paramètres quant à la qualification des tourbes. Du point de vue des autres paramètres, il faut noter la séparation entre les fractions ">2000 μm " et "200 à 2000 μm " ainsi que la composition muscinale et sphagnale. Le taux de fibres est nettement plus influencé par la fraction "200 à 2000 μm ". La présence majoritaire de sphaignes dans la composition de la tourbe fournit principalement des fibres de petite taille. La teneur en matière organique (M.O.) est également corrélée au vecteur "humidité" bien que son angle soit légèrement ouvert.

A l'opposé, corrélés négativement aux deux premiers vecteurs, nous notons les vecteur "cendres" et "pyro". Si le taux de cendres est nettement différencié, en ayant une relativement faible relation avec les petites fractions granulométriques, le vecteur "pyro" montre une bonne corrélation avec la présence d'agrégats et la teneur en N. La teneur en bois, en herbacés et en éléments ligneux se localisent dans le même faisceau mais avec des significations un peu moindre. La CEC est également corrélée au vecteur "pyro" mais avec une signification moyenne. Ce fait a déjà été expliqué lors de la description des profils.

Les vecteurs "cations" et "alcalinité" sont indépendants de l'axe principal défini par l'opposition deux à deux des 4 premiers faisceaux.

Enfin, il faut noter le comportement indépendant du Ca, qui est lié à l'axe 3 par sa position perpendiculaire au plan 1-2. La projection du plan 1-3 permet de constater que les deux pH sont assez bien corrélés au Ca par rapport à l'axe 3, ce qui atteste encore la signification secondaire de ce vecteur pour l'interprétation du plan 1-2.

Ces résultats sont cohérents par rapport à la qualification des sols tourbeux. Les relations "paramètres-échantillons" reflètent également cette logique par l'identification de trois nuages.

Le premier nuage groupe les horizons fibreux, à forte humidité. Il rassemble la majorité des échantillons des marais tremblants, ainsi que les horizons profonds des Pontins.

Le deuxième groupe, en position centrale, rassemble certains horizons de chaque série. Pour la série des marais tremblants, on y note les tourbes à laïches, partagées entre la dominance des herbacées et un taux de fibres élevé. Pour la série des touradons, il y a les horizons de surface des Pontins, encore fibreux mais déjà chimiquement dégradés, avec cendres et pyro hauts. Le corps du groupe est néanmoins formé par les horizons de tourbe ancienne et néoformée de la série des gazons muscinaux dont les caractères sont assez moyens et peu différenciés.

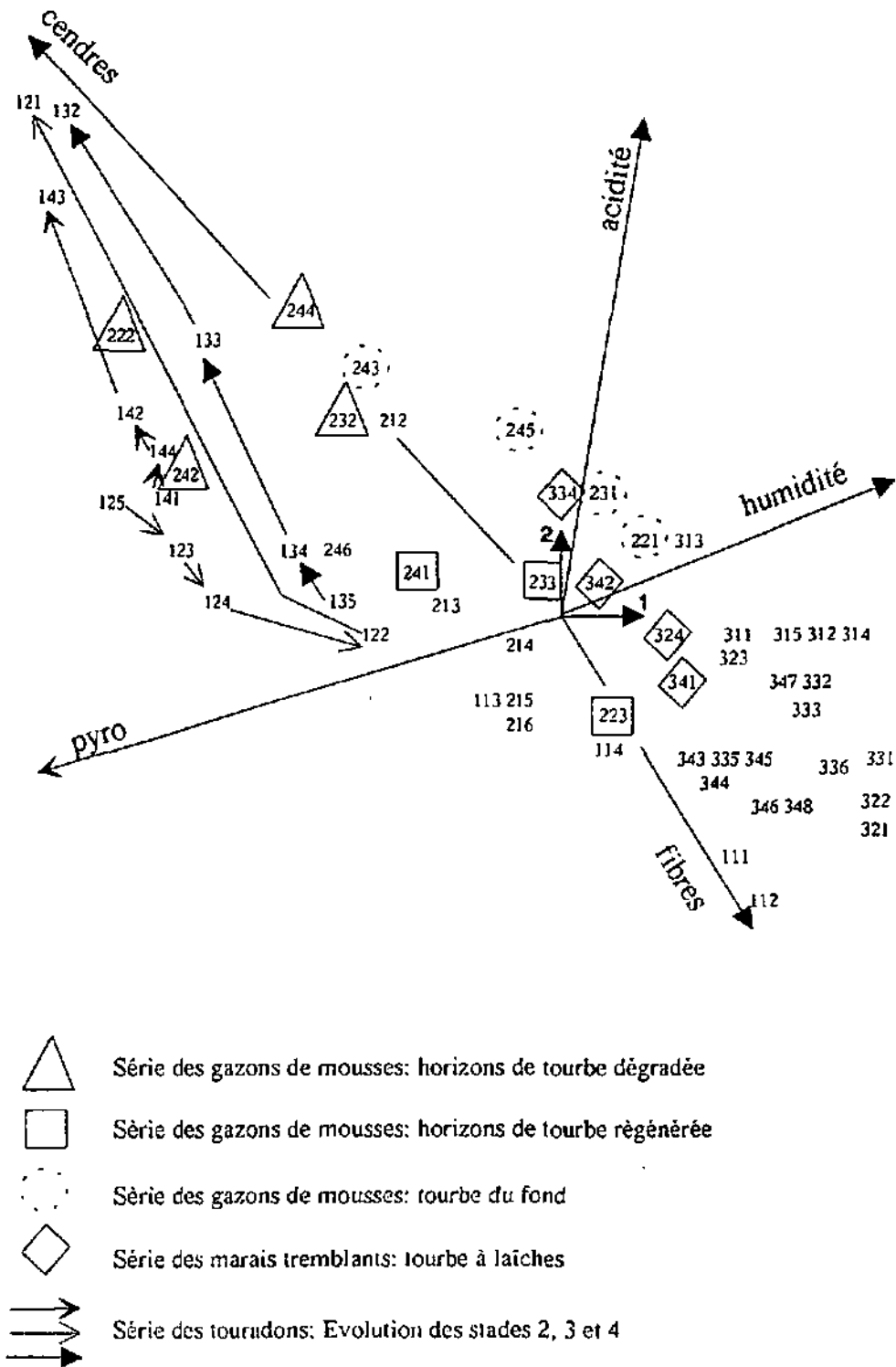
Le troisième groupe rassemble les tourbes dégradées, au pyro élevé et au taux de cendres important, avec corrolairement un caractère fibrique faible ou absent. On trouve dans ce groupe les tourbes dégradées de la série des gazons de mousses ainsi que tous les horizons tourbeux des stades 2, 3 et 4 de la série des touradons.

Il faut noter que 3 horizons sont localisés à l'extérieur des trois groupes, le long du vecteur "cations". Il s'agit des horizons marneux de la série des touradons, ce qui est parfaitement logique, vu leur forte concentration en Mg (fig. 57).

Considérant les nuages formés par le groupement des échantillons de tourbe et leur signification, il n'est pas surprenant que les paramètres "bois", "herbe" et "ligneux" soient opposés aux "mousses" et "sphaignes" mais avec une force discriminante moindre. Aucun horizon ne peut être qualifié de manière prépondérante par sa teneur en bois ou en ligneux. Quant aux tourbes à laïches, leur composition botanique est liée à une teneur en fibres élevée par la nature même des constituants, augmentant l'importance de ce caractère au détriment de leur composition botanique particulière.

L'analyse de l'ACP globale confirme parfaitement les caractéristiques des profils mis en évidence lors de la description classique ainsi que lors des classifications liées à certains paramètres particuliers. Elle permet par contre une intégration de l'importance relative de chaque paramètre pris en compte en montrant nettement leurs degrés de "parenté". Dès lors, elle montre que pour les tourbes, l'opposition "fibres-pyro", et par conséquent la classification qu'elle permet, est déjà fortement discriminante pour la caractérisation des sols. L'importance de l'approche granulométrique est confirmée par la position propre des 4 vecteurs "fractions granulométriques", qui permettent une différenciation de second niveau entre les 4 vecteurs principaux.

Figure 58: ACP partielle avec tous les échantillons et les 5 paramètres de base
 plan 1-2 avec 64,9% et 19,9% = 84,8% de représentativité



4.5.3. L'ACP partielle limitée aux 5 paramètres de base

Vu les résultats de l'analyse globale, il n'est pas surprenant de constater que l'image fournie par l'ACP limitée aux paramètres analytiques classiques pour les tourbes confirme parfaitement le rôle discriminant primordial de ces variables. "Humidité" et "fibres" sont opposés aux "pyro" et "cendres". L'acidité est à nouveau dans un axe perpendiculaire, avec une signification moindre. Ce résultat est exactement conforme à celui mis en évidence par GOBAT *et al* (1986). Il indique donc que nos échantillons s'intègrent aux propriétés générales des tourbes du Jura, qu'elles caractérisent des milieux primaires et intacts ou secondaires et fortement modifiés.

Les nuages formés par le degré de similitude des types de tourbe sont identiques à ceux de l'analyse globale. En imposant un poids relatif plus grand à chaque paramètre testé, l'étalement des points sur le plan de projection est meilleur, ce qui permet une analyse plus détaillée par série et par stade. Nous avons fait ressortir sur la figure 58 quelques éléments fortement significatifs quant à l'interprétation de l'évolution des sols.

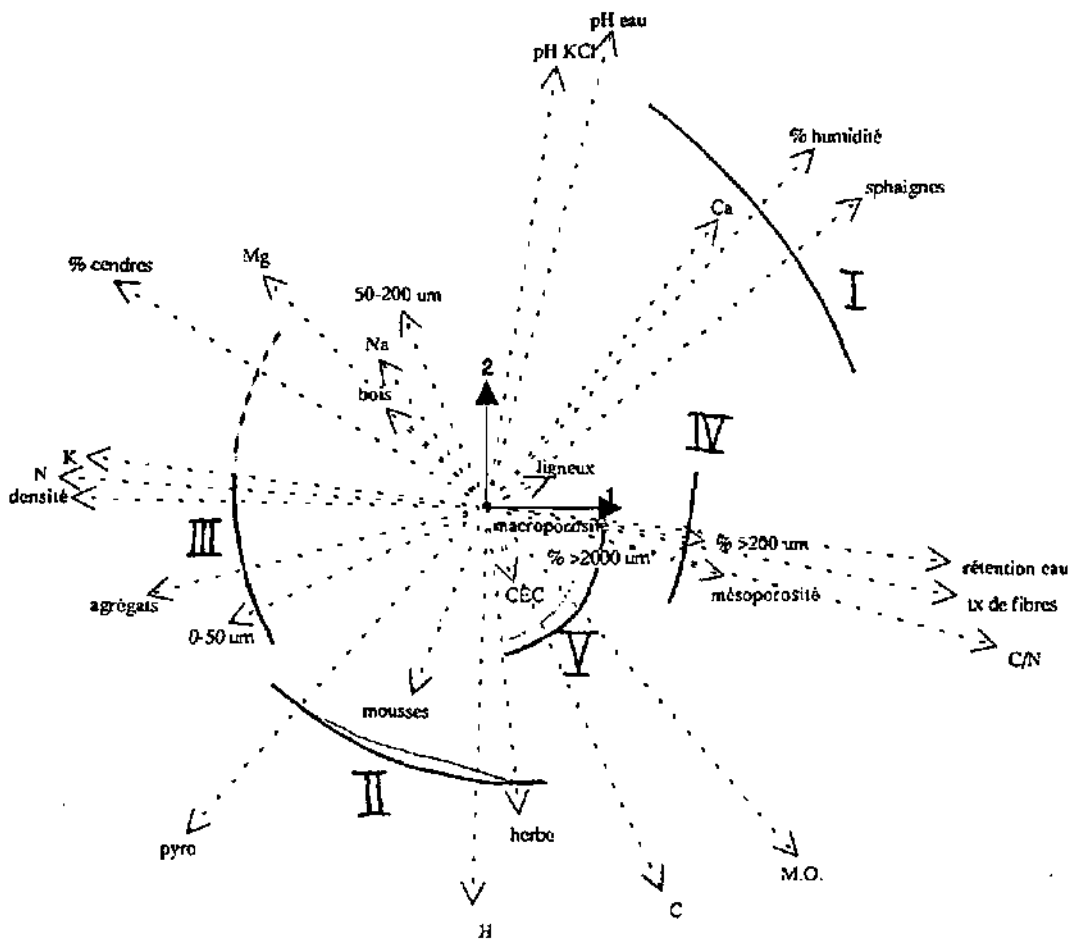
Pour la série des touradons, nous retrouvons l'isolement des valeurs du premier stade avec, pour ce dernier, différenciation entre surface et profondeur. Pour les autres stades, il y a une nette opposition de fonctionnement entre le stade 2 et les stades 3 et 4. Les flèches relient les horizons de la surface vers la profondeur. Elles montrent pour le stade 2 une diminution progressive de l'influence "cendres-pyro" dans la tourbe qui a, en profondeur, un caractère fibrique prononcé. Un saut très net marque le passage au substrat minéral avec changement complet de direction et influence prépondérante du taux de cendres. Pour les stades 3 et 4, l'évolution des cendres dans le profil est totalement inversée provoquant une position en gradient croissant de la surface vers la profondeur, le long de l'axe du vecteur "cendres".

Pour la série des gazons muscinaux, il y a une bonne différenciation entre les horizons dégradés des stades 2, 3 et 4, les horizons régénérés de surface (très centré) et ceux de tourbe ancienne, particulièrement influencés par la saturation hydrique.

Pour la série des marais tremblants, le premier stade est plus particulièrement corrélé au vecteur "humidité". Pour les autres stades, il est possible de faire ressortir les tourbes de fond, caractérisées par une position plus centrée, indiquant une augmentation du taux de cendres et de l'indice pyro. L'évolution de cette tourbe, modifiée par le temps malgré l'asphyxie hydrique, se marque ici plus que la composition botanique.

L'intégration des données de GROSVERNIER (1996) n'influence aucunement les faisceaux de paramètres. Les échantillons se répartissent dans les trois groupes défini lors de l'ACP globale selon leur degré de décomposition. Les tourbes du *Sphagnion magellanicum* se placent dans le groupe 1, confirmant l'homologie fonctionnelle des marais tremblants à sphaignes avec le centre du haut-marais. A l'autre extrême, les échantillons de surface des tourbes agricoles sont proches des sols de La Chaux-d'Abel et viennent se placer dans le groupe 3, avec les horizons de surface de la lande asséchée des recherches de GROSVERNIER. Pour les horizons profonds (dès 30 cm) de ces deux profils, les caractères sont assez moyens et provoquent un positionnement dans le groupe 2.

Figure 59: ACP partielle. Echantillons avec mesure de porosité (15) avec 31 paramètres
 plan 1-2 avec 24% et 19,2% = 43,2% de représentativité



4.5.4. L'ACP partielle limitée aux échantillons intégrant les mesures de porosité

L'ACP partielle effectuée sur les horizons caractérisés par l'état de compaction et la porosité des tourbes révèle le caractère complémentaire de ces paramètres par rapport aux autres (figure 59). Les faisceaux sont peu modifiés, en particulier pour la caractérisation "fibres-humidité". La capacité de rétention en eau est fortement corrélée au taux de fibres, avec une forte signification. Les macro- et mésoporosités caractérisent le même faisceau mais avec une force moindre. Pour cette analyse, les deux composantes du taux de fibres sont rassemblées, provoquant une individualisation du vecteur "humidité". La densité provoque une redistribution des caractères complémentaires des vecteurs "cendres" et "pyro", par une position centrale entre les faisceaux et une attraction nette des paramètres "N", "agrégats" et un peu moins de la fraction "0-50 µm".

Si les 5 paramètres de base ne sont pas modifiés, les autres perdent assez fortement les corrélations mise en évidence lors de l'analyse globale. Ainsi, la position des compositions botaniques, des fractions granulométriques et des cations mobilisables est redistribuée en fonction de leur degré de parenté face aux valeurs des nouveaux paramètres. Ce fait démontre à nouveau la hiérarchisation des paramètres discriminants pour la caractérisation des tourbes.

Nous avons figuré (fig. 59) les dispersions angulaires et l'éloignement relatif au centre des axes des horizons testés. Cinq groupes sont identifiables. Ils sont définis par la force marquée des vecteurs principaux et reflètent totalement les caractères déjà décrits:

- groupe I: tourbe jeune et tourbe de fond de la série des gazons de mousses, en opposition avec les groupes II et III.
- groupe II: série des touradons, stades 3 et 4 avec l'horizon profond du stade 2
- groupe III: horizons décomposé de la série des gazons de mousses et surface du stade 2 de la série des touradons.
- groupe IV: série des touradons, stade 1
- groupe V: série des gazons de mousses, stade 1

Les échantillons de GROSVERNIER (1996) ne modifient pas non plus la projection des faisceaux de paramètres. Aucun groupe nouveau d'horizons n'est constitué et leur répartition peut se résumer ainsi: Le *Sphagnion magellanici* et l'horizon profond des sols agricoles sont dans le groupe I alors que le groupe III reçoit la surface des tourbes agricoles et les deux profondeurs de la lande asséchée.

4.6. CONCLUSION

Considérés sous l'angle de la régénération des tourbières, ces résultats montrent une bonne uniformité dans l'évolution des sols tourbeux jurassiens. L'analogie des modifications constatées et de la caractérisation des tourbes entre les travaux de GOBAT *et al.* (1986) et ceux de nos séries est à mettre en relation avec la grande homogénéité des types de hauts-marais jurassiens, principalement bombés et concentriques. Ainsi, la très grande majorité des tourbes sont constituées d'une forte proportion de sphaignes avec, pour les horizons profonds, des tourbes à laïches.

En rapport avec les multiples atteintes humaines, somme toute contemporaines et relativement similaires, l'évolution des sols marque une modification chimique rapide (augmentation de l'indice pyro et du taux de cendres), avec le maintien net du caractère fibrique et, par conséquent, une bonne capacité de rétention en eau. Cette conjonction dynamique dans l'évolution des tourbes révèle actuellement des niveaux de "dégradation" variables.

Néanmoins, les propriétés majeures actuelles des sols permettent de maintenir et d'exprimer le potentiel de cicatrisation et de régénération par les sphaignes, qui restent fortement concurrentielles face aux autres plantes.

Les caractéristiques granulométriques de la tourbe analysée après la cicatrisation du sol par les herbacées et les éricacées montrent une double évolution. L'ancienne tourbe (matrice de base du sol) se dégrade physiquement, ce qui est attesté par la forte proportion de microagrégats dans les échantillons. Il y a donc bien une diminution de taille des éléments tourbeux anciens avec un début de structuration en relation avec les modifications chimiques.

L'apparition des plantes en surface provoque une pénétration racinaire jeune en profondeur avec comme conséquence une modification des caractères généraux de la tourbe qui apparaît comme fibreuse à l'analyse brute.

Si ce résultat semble contradictoire, ou en tout cas non illustratif de la dégradation réelle de la tourbe, il est par contre en accord avec le caractère **fonctionnel** du substrat quant à la gestion de l'eau (capacité de rétention, écoulement vertical et horizontal, remontée capillaire) ce qui est fondamental pour comprendre et expliquer la réapparition des sphaignes. Ce phénomène est particulièrement important en présence des touradons d'*Eriophorum vaginatum*, alors qu'avec la présence d'une strate muscinale (*Polytrichum strictum*), la dégradation physique s'exprime plus nettement avec la mise en évidence d'horizons de dégradation mésiques.

Comme les interventions humaines sont toutes à peu près contemporaines, il n'est pas aisé de définir le sens futur de l'évolution des caractères pédologiques de ces sols. Il est probable que deux **voies pédologiques distinctes se mettent en place.**

Pour les sites régénérés, la présence de sphaignes en tapis épais, différenciant de jeunes buttes, indique la stabilisation de l'activité turfigène nouvelle et l'accumulation de tourbe jeune. Les sols vont donc continuer à s'épaissir et ils retrouveront, petit à petit, les caractères pédologiques du *Sphagnion magellanici*, avec différenciation fonctionnelle nette de l'acrotelme et de la catotelme (INGRAM, 1978).

Pour les sites sans régénération, il est fort probable que la dégradation physique de la tourbe s'accélère au détriment de la décomposition chimique, provoquant le phénomène décrit par SCHNEEBELI (1991). La tourbe devient **mésique**, s'**imperméabilise** et permet une modification des caractéristiques hydriques de surface (nappe perchée temporaire), assurant à terme, selon la microtopographie, de bonnes conditions pour la régénération, en particulier la réimplantation des sphaignes.

Pédologiquement, nous considérons que la clef du succès (observée sous l'angle de la réussite de la régénération) n'est pas uniquement temporelle. En effet, nous formulons l'hypothèse que si les deux premiers stades des séries "terrestres" sont encore dénudés, c'est à cause de la **forte érosion de surface** liée à la pente du sol. De plus, les croûtes bactériennes et alguesques provoquées par les alternances "sec-humide" imposent une action mécanique négative. L'évolution pédologique est ainsi fortement perturbée et freinée par le décapage régulier de la tourbe de surface ainsi que des diaspores, mettant systématiquement à nu de nouveaux "horizons". **L'érosion maintient ainsi préférentiellement la décomposition chimique et empêche l'imperméabilisation de la surface.**

Pédologiquement, les différences entre séries aquatiques et terrestres sont très grandes. Pour les marais tremblants, le phénomène de paludification (GORE, 1983) permet la création d'un sol jeune par accumulation des débris végétaux. **Le sol n'est donc rien d'autre que la végétation qui se développe à sa surface.** Seuls les stade 3 et 4 permettent une différenciation d' "horizon" avec formation de tourbe. Pour les systèmes terrestres, l'exploitation de la tourbe a totalement détruit l'acrotelme et une partie de la catotelme. La tourbe de fond, mise à nu, est suffisamment évoluée et ancienne pour qu'elle ne puisse plus assurer une régénération spontanée par des éléments dormants (CLYMO & DUCKETT, 1986). Cette tourbe subit donc une dégradation.

Malgré ces différences fondamentales, il est très important de noter que la classification générale de toutes ces tourbes est basée sur 4 paramètres majeurs, fortement intégrateurs:

- | | |
|----|---|
| 1° | Le taux de fibres, en relation avec la rétention en eau |
| 2° | L'indice pyro, en relation avec la densité apparente |
| 3° | Le taux de cendres |
| 4° | Le taux d'humidité |

L'acidité ainsi que la proportion des cations majeurs apparaissent comme des paramètres de second ordre.

La composition botanique est corrélée aux paramètres majeurs et apparaît comme un élément de différenciation des tourbes important, mais non comme un critère de classification.

Ces résultats sont en accord avec ceux de GIUGNI (1991) sur les tourbe des bas-marais des Préalpes chablaisiennes.

5. HYDRODYNAMIQUE

INTRODUCTION

La mesure de l'évolution des nappes au cours de la saison en relation avec les groupements végétaux est, en Suisse, une analyse classique dans le cadre des recherches sur les bas- et hauts-marais (MATTHEY W. 1964, 1971, YERLY 1970, BUTTLER & CORNALI 1983, MATTHEY Y. 1984, GIUGNI 1991). Si elle s'applique parfaitement aux milieux primaires, dont l'équilibre biologique garantit de bonnes corrélations entre les caractères pédologiques, hydriques et les groupements végétaux, cette mesure est nettement plus aléatoire dans les marais fortement perturbés. Comme l'indique NIEMANN (1963, 1967 in BUTTLER 1987 et GIUGNI 1991), il est possible de mettre clairement en relation la végétation avec la nappe uniquement quand l'homogénéité pédologique et climatique est assurée et lors d'une étude très détaillée de la végétation. Nos observations vont parfaitement dans ce sens.

Ainsi, vu les sols étudiés et leurs conditions multiples de formation et d'évolution, les nappes réagissent parfois sans grandes relations apparentes avec la végétation qui recolonise le sol. Le but principal de notre investigation vise la mise en évidence des conditions hydriques à proximité du niveau superficiel du sol, la comparaison des différents stades de chaque série, l'influence de l'apparition des coussinets et des tapis de sphaignes et l'effet éventuel de cette couverture de sphaignes. Les relations entre la structure et la texture des solums et les mouvements de l'eau, en particulier par la création de nappes perchées, seront également discutées, puisque l'étude des conditions hydriques est abordée avant tout sous l'angle pédogénétique.

Les HISTOSOLS sont caractérisés par la présence d'une nappe d'eau permanente ou temporaire, fluctuant à travers le profil pédologique. Ces conditions ont une importance écologique fondamentale quant au déterminisme d'apparition des sphaignes et au dynamisme de la régénération. Dans notre étude, par analogie aux travaux menés par BUTTLER (1987), nous distinguons plusieurs types de nappes. Leurs dynamiques sont fondamentales pour les différentes strates de végétation, dont l'accessibilité à l'eau est très diverse selon l'autoécologie des différentes espèces présentes. Ainsi, la nappe peut refléter le niveau phréatique permanent, un niveau temporaire ou encore une nappe perchée, formée en relation avec un horizon moins perméable du sol. Ces trois notions sont à critiquer afin d'en comprendre le rôle pour la végétation. De plus, la présence, l'épaisseur et le rôle de la frange capillaire sont fondamentaux pour le dynamisme végétal.

Conscient des difficultés à surmonter, en particulier quant à l'absence de nappe libre pour plusieurs stades, et à la faible épaisseur d'horizons-clefs, nous avons tenté une approche très ciblée en diversifiant la prise de données par la conduite d'une campagne piézométrique doublée de tensiomètres. Les résultats sont exploités de diverses manières. Pour les piézomètres, nous avons dessiné les courbes de variation des niveaux pour chaque profondeur de prélèvement. La comparaison graphique renseigne directement sur la présence de nappes perchées temporaires, leur période d'apparition, et sur les événements saisonniers particuliers (inondation, assèchement), en relation avec les précipitations. Nous avons également exprimé les courbes de dépassement permanent qui complètent les courbes de variations et permettent une comparaison entre les sols pour les différentes profondeurs. Pour les données tensiométriques, nous avons également dessiné les variations au cours du temps en fonction des profondeurs de mesure. Dans l'optique d'une compa-

raison et d'une estimation de la complémentarité entre les informations piézométriques et tensiométriques, nous avons calculé également les courbes de dépassement permanent pour les tensiomètres. Un classement des nappes et des stades des trois séries est proposé.

L'étude des nappes a été abordée par de nombreux auteurs pour des travaux écologiques, en particulier dans les marais. Nous citerons ici BADEN & EGGELSMANN (1964), KLOETZLI (1969), YERLY (1970), EGGELSMANN (1971, 1977 a et b, 1980), RYCROFT *et al.* (1975 a et b), EGGELSMANN & SCHUCH (1976), MANNERKOSKI (1985), BUTTLER (1987), SIEGEL & GLASER (1987), SCHNEEBELI (1988, 1991), GIUGNI (1991). Dans le cadre de la synthèse générale de A.J.P. GORE, sur le fonctionnement des écosystèmes mondiaux, INGRAM (1983) a rassemblé nombre de résultats dans son chapitre sur l'hydrologie des marais.

5.1. METHODE

Les méthodes générales sur l'hydrodynamique sont décrites au chap. 1.4.2. Nous ne précisons ici que les aspects de détail, liés au choix des sites d'implantation.

Nous avons choisi les profondeurs d'échantillonnage en relation étroite avec les profils pédologiques décrits. De plus, la spécificité propre de chaque série et de chaque stade nous a dirigé quant au choix de la position et du nombre de stations de mesures à mettre en place.

Pour la série des touradons, nous avons examiné à chaque stade le rôle du touradon d'*Eriophorum vaginatum* en implantant dans la souches et sous celle-ci des piézomètres et des tensiomètres. Trois profondeurs de prélèvement ont été définies par similitude avec la station placée entre les touradons, en fonction des horizons pédologiques. Pour la série des gazons de mousses, nous avons analysé une station par stade avec trois profondeurs également, en testant le rôle de l'horizon dégradé sur les mouvements hydriques. Quant à la série des marais tremblants, les deux premiers stades ont une station chacun et deux profondeurs, très proche de la surface afin de mettre en évidence d'éventuelles fluctuations dans le tapis végétal. Pour les deux stades évolués (3 et 4), nous avons différencié les replats de sphaignes et les buttes au moyen de deux stations par stade et de deux ou trois profondeurs en fonction des horizons décrits.

Les mesures ont été effectuées en 1991, durant la période de végétation, soit du 14 avril au 15 octobre. A raison de tournées complètes tous les 15 jours (par manque de temps), cette période permet d'analyser les résultats de 14 séries de mesures seulement. Cette périodicité apparaît insuffisante à l'analyse pour bien mettre en évidence l'apparition sporadique et courte de nappes perchées dans certains sites. Considérant l'étroite relation entre ces phénomènes et les précipitations, inégales d'une tourbière à l'autre à travers l'arc jurassien, il est presque certain qu'une mesure hebdomadaire n'aurait pas pleinement résolu le problème. Nous considérons en effet comme nécessaire de pouvoir répondre de manière directe aux conditions climatiques locales et de calquer les mesures sur les événements météorologiques précis (en particulier les orages d'été ou les périodes de sécheresse prolongée). Par la périodicité régulière de nos mesures, il est certain que nous avons perdu cette précision en effectuant parfois la tournée un jour après le retour des pluies, alors que trois semaines de temps sec et chaud avaient précédé. La plus grande succion mesurée n'est ainsi pas une valeur maximale pour la saison.

Figure 60: Variations saisonnières du niveau de la nappe

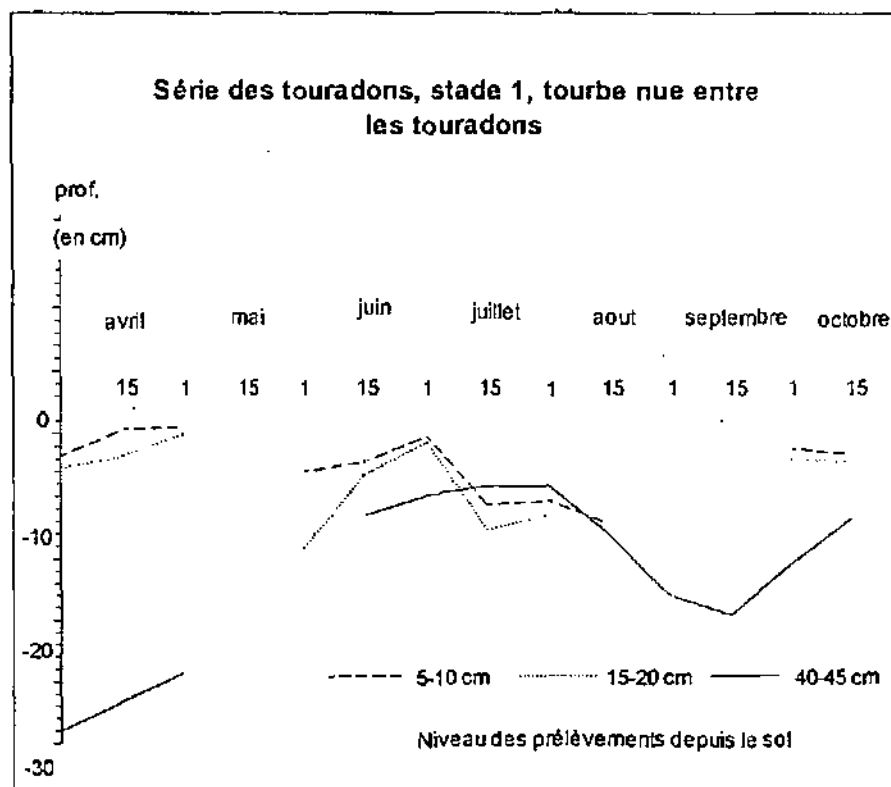
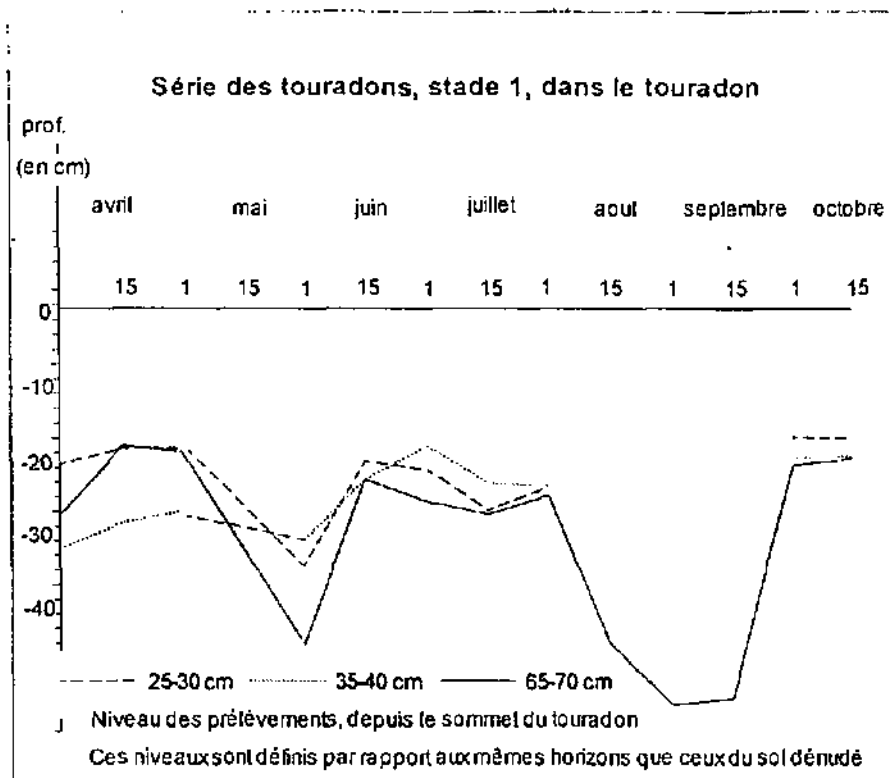


Figure 61: Variations saisonnières du niveau de la nappe

De plus, selon les remarques de YERLY (1970), citant NIEMANN (1963), notre périodicité de mesures est trop peu importante pour permettre de calculer et d'interpréter correctement les courbes de dépassement permanent. Il indique comme indispensable une mesure hebdomadaire, voir quotidienne pour garantir une courbe représentative. Nous aurions pu, comme l'a fait BUTTLER (1987), interpoler linéairement les valeurs intermédiaires. Avec 15 jours entre chaque mesures, cette méthode nous paraît peu informative. Dès lors, les courbes illustrées sont surtout indicatrices de tendances et à utiliser uniquement pour des comparaisons directes entre nos stades.

Les courbes de dépassement permanent de la nappe ont été calculées par classes de 5 cm (22 classes possibles). Il est certain que, pour les horizons de surface, toutes les classes ne peuvent pas être atteintes puisque le piézomètre dépasse largement au-dessus du sol. Pour les courbes identiques, liées à la succion, nous avons créé 30 classes pour un intervalle régulier de 20 cm d'eau. Dans les deux cas, la durée totale équivaut à 193 jours.

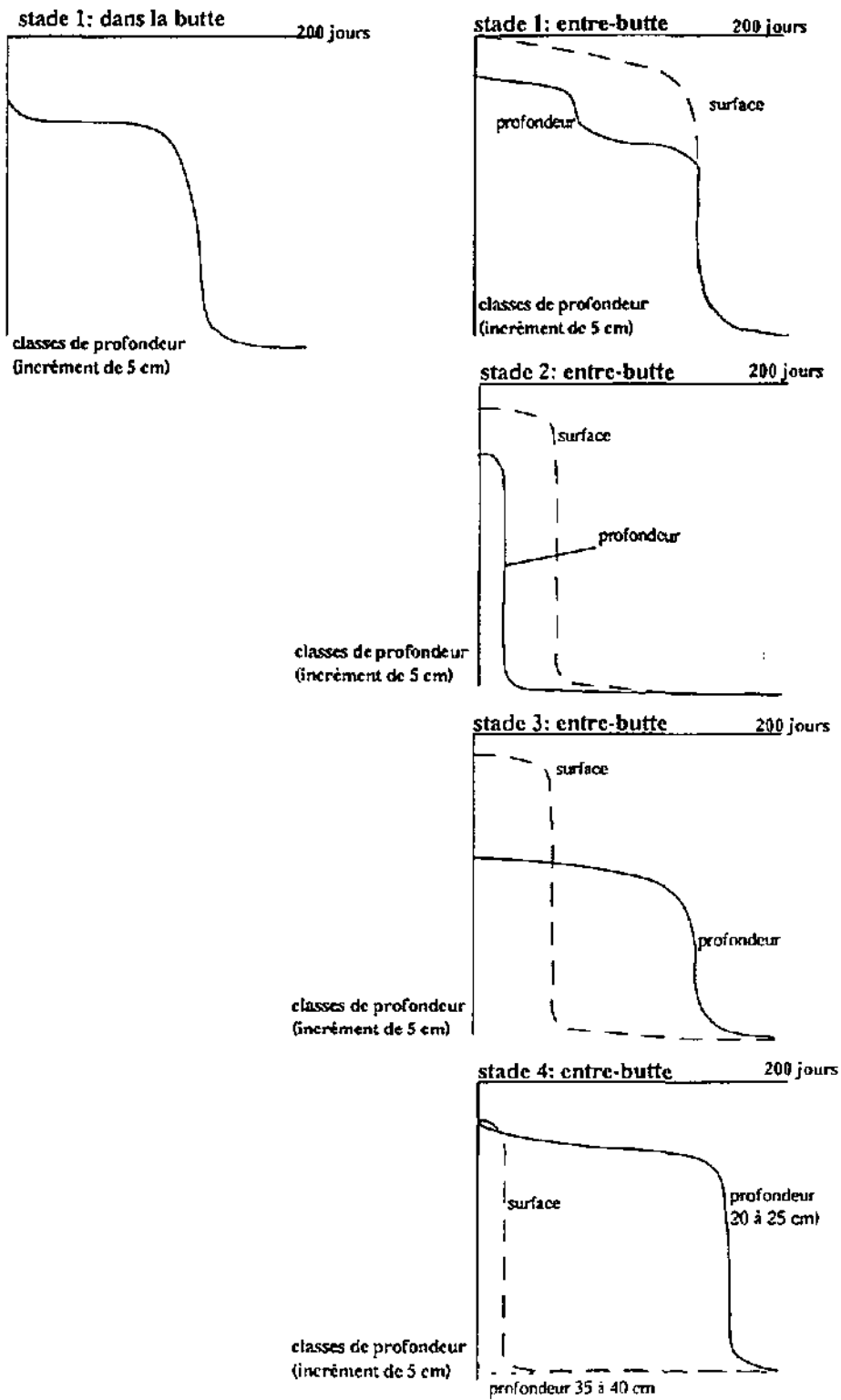
5.2. CARACTERISATION DES CONDITIONS HYDRIQUES DES SOLS

5.2.1. Généralités

En présence d'une nappe d'eau libre, tous les pores grossiers sont saturés. La nappe est mesurée par la position de la profondeur à laquelle l'équilibre entre les pressions de l'eau et de l'air est réalisé. Il se crée alors à cette position une surface piézométrique qui fluctue continuellement sous les variations des entrées d'eau (précipitation, ruissellement) et des sorties (drainage gravitaire et latéral, évapotranspiration). Les mouvements verticaux sont ainsi directement liés au climat et aux caractéristiques du sol dont l'hétérogénéité peut ralentir l'écoulement ou le favoriser, provoquant l'apparition de nappes indépendantes temporaires.

Les battements de la nappe jouent un rôle primordial pour la vie végétale dans les marais, dont la principale caractéristique est un engorgement important du sol qui dicte le fonctionnement biologique. Les modifications provoquées par les travaux humains dans les hauts-marais (abaissement du niveau du sol, accélération du drainage) influencent considérablement les caractéristiques hydriques initiales. Les vitesses d'écoulement (exprimées par le facteur (K) de conductivité hydraulique) sont modifiées par la mise à nu de la tourbe et son tassement. Pour les tourbes, la synthèse d'INGRAM (1983) indique clairement que la conductivité hydraulique est extrêmement variable, au sein même des hauts-marais intacts, et qu'il existe une différence fondamentale entre la partie supérieure du haut-marais (l'acrotelme, selon la définition de INGRAM, 1978) et les horizons de fond (la catotelme). La valeur moyenne donnée pour l'acrotelm indique une grande vitesse d'écoulement, avoisinant 2,7 m/24h ($3.12 \cdot 10^{-5}$ m/s) Ce résultat est comparable à celui donné par DUCHAUFOR (1984) pour les sables! Pour la catotelme, dont les propriétés physico-chimiques sont beaucoup plus diverses que pour l'acrotelm, les valeurs sont beaucoup plus variables. Ainsi, selon les différents travaux compilés par INGRAM, la composition botanique, la densité apparente, le taux de fibres, le degré d'humification sont autant de facteurs influençant la vitesse de perméabilité. Les tourbes à sphaignes sont ainsi moins perméables que les tourbes à laïches ou à roseaux. La perméabilité diminue avec l'augmentation du degré d'humification et avec la diminution du taux de fibres. Elle évolue par contre de manière inversement proportionnelle à la densité apparente. PAEIVAENEN (1973) considère que la relation est moins bonne avec la densité apparente qu'avec le degré d'humification. Les valeurs données pour la catotelm varient entre 0.5 cm/24h ($5.7 \cdot 10^{-8}$ m/s)

Figure 62: Représentation schématique de quelques courbes de dépassement permanent de la nappe phréatique, série des touradons



pour une tourbe à sphaignes très humifiée à 86 cm/24h ($9.9 \cdot 10^{-6}$ m/s) pour une composition botanique identique mais une humification très faible (PAEIVAENEN, 1973). La valeur moyenne donnée par INGRAM est de 8 cm/24h ($9 \cdot 10^{-7}$ m/s). YERLY (1970) confirme ces chiffres pour les hauts-marais non drainé (84 cm/24h = $9.7 \cdot 10^{-6}$ m/s) et fournit des chiffres intéressants quant à l'influence du drainage sur la diminution de la perméabilité (65 cm/24h = $7.5 \cdot 10^{-6}$ m/s) après 3 ans de drainage et 3 cm/24h ($3.5 \cdot 10^{-7}$ m/s) après 40 ans de drainage). La perméabilité est en relation étroite avec les capacités de remontées capillaires. YERLY (1970), citant KUNTZE (1965), indique une remontée de 20 à 90 cm de la frange capillaire suite au tassement dû au drainage.

Dans le même ordre d'idée PAEIVAENEN (1973) indique que, dans les hauts-marais, la frange de capillarité se développe sur une hauteur de 20 à 40 cm au moins. Dans ce volume, les pores sont saturés en eau sans qu'il y ait de nappe libre. MANNERKOSKI (1985) indique que la frange capillaire diminue nettement lorsque la nappe s'abaisse à plus de 50 cm de profondeur dans une tourbe à sphaignes. Dans les horizons non saturés, le potentiel capillaire mesuré par les tensiomètres renseigne directement sur la disponibilité de l'eau pour les plantes. La succion est corrélée à la texture ce qui veut dire que pour une quantité identique d'eau dans un sol, la force de succion est d'autant plus grande que la texture est fine ou que les sols à texture fine retiennent plus fortement une quantité identique d'eau que les sols grossiers. BUTTLER (1987), citant BUCHTER (1984) donne les classes de succion suivante:

Succion de	1 à 80	cm d'eau:	eau facilement drainable (pF < 1.9)
	80 à 690		eau facilement disponible (pF de 1.9 à 2.8)
	690 à 15000		eau difficilement disponible (pF 2.8 à 4.2)
	> 15000		eau non disponible (pF > 4.2)

5.2.2. Série des touradons

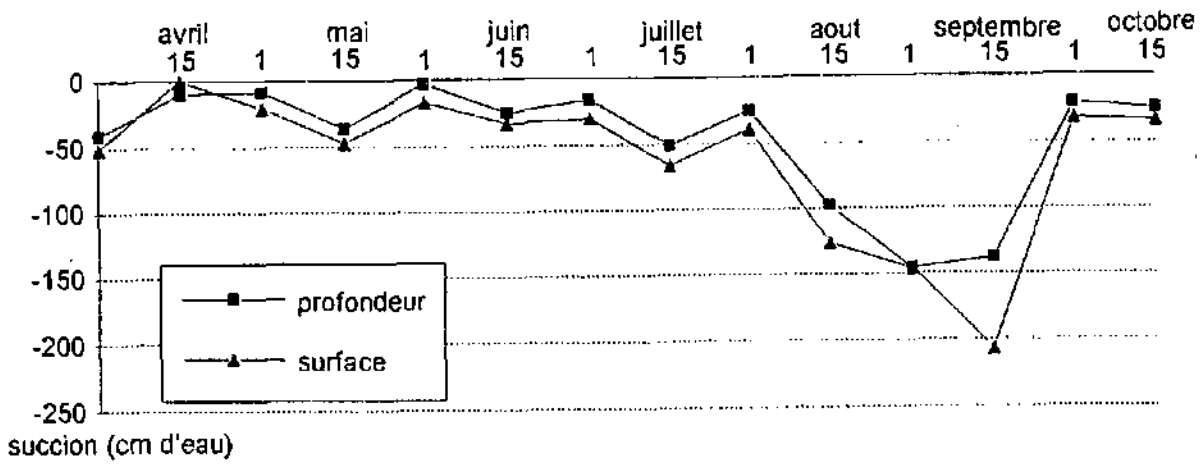
Le premier stade, localisé à la tourbière des Pontins sur un sol profond et fibreux, possède une nappe phréatique permanente dont les fluctuations sont proches de la surface. De manière générale, les conditions hydriques qui caractérisent son sol en profondeur sont parfaitement comparables à celles d'une pinède asséchée ou d'une pessière (profondeur moyenne de la nappe de -25 cm pendant la saison de végétation) avec des fluctuations saisonnières entre -10 cm et -50 cm environ. La position géographique de notre site d'études dans la tourbière des Pontins, à proximité immédiate de la pinède, légèrement en contre-bas suite aux exploitations de la tourbe, explique ces caractéristiques hydriques. Pour les trois stades localisés à la tourbière de La Chau-d'Abel, la position géographique en bordure du marais, la forte exploitation et l'important réseau de drainage expliquent facilement l'absence de nappe permanente pour les trois stades. L'analyse détaillée des résultats permet heureusement de compléter cette image très tranchée et apparemment contradictoire quant à l'unité fonctionnelle de la série décrite.

5.2.2.1. Les variations saisonnières du niveau de la nappe

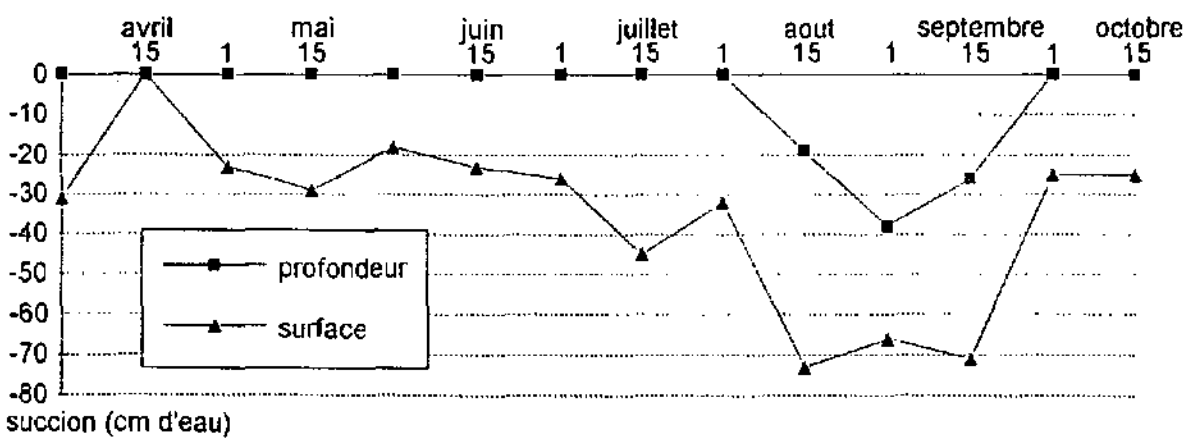
Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, seul le premier stade permet l'illustration des courbes de variations de profondeurs de la nappe. L'analyse des courbes de variations piézométriques calculées séparément pour les tubes plantés dans le touradon et ceux plantés entre les touradons, là où la tourbe est dénudée permet de mettre en évidence l'existence d'une nappe perchée

Figures 63, 64 et 65: Variations saisonnières des succions

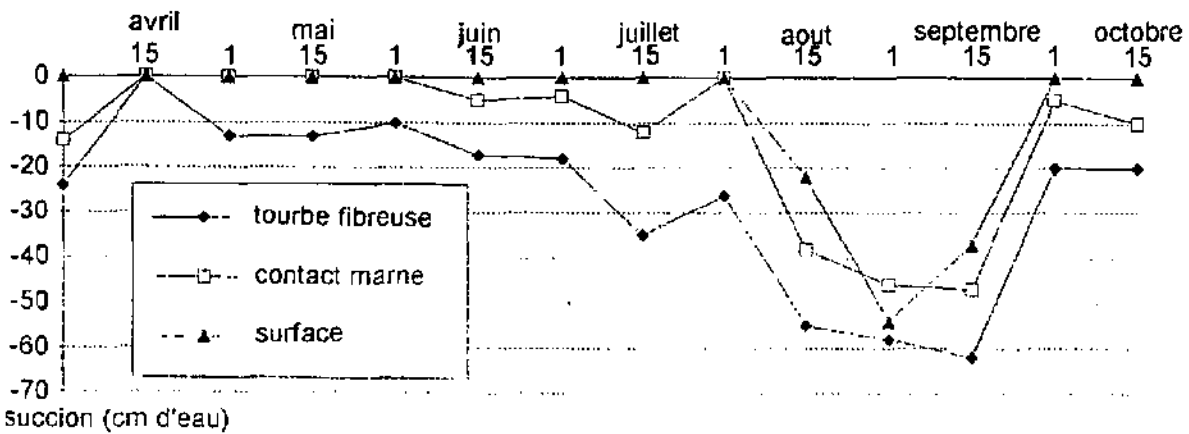
Série des touradons, stade 2, entre-butte



Série des touradons, stade 3, entre butte



Série des touradons, stade 4, entre-butte



temporaire dans la masse de tourbe alors qu'au niveau du touradon, il y a continuellement relation directe entre les piézomètres des trois profondeurs (fig. 60 et 61). La figure 61 montre clairement un décalage entre les deux niveaux de surface (0 à 20 cm) et la mesure de profondeur (45-50 cm). Ainsi, jusqu'à début août, une nappe a été mise en évidence dans la tourbe de surface. Dans le même laps de temps, la nappe de fond a fluctué de manière indépendante, montant sous l'effet de l'écoulement gravitaire lent depuis la surface du sol. A fin juillet, les nappes sont jointes et il est même mesuré une valeur plus hautes dans le tube placé au fond. Ce phénomène a déjà été mis en évidence par AHTI (1987). Il provient de la différence de pression exercée par la masse d'eau sur les différents piézomètres en fonction du niveau de prélèvement; pour le tube du fond la pression a tendance à pousser l'eau dans le tube, dont le mouvement est plus facile que dans le sol. Par conséquent, l'eau monte plus haut que le niveau d'équilibre réel. A partir de début août, la période sèche prolongée provoque une diminution du niveau de la nappe qui, n'étant pas alimentée par les précipitations, disparaît des horizons de surfaces. Le retour des pluies à partir du 20 septembre provoque à nouveau l'apparition de la nappe perchée. En accord avec les considérations de AHTI (1987), citant HILLEL (1971), la conductivité hydraulique de la tourbe diminue avec la profondeur en fonction de l'humification croissante. Pour notre profil, ce décalage s'explique parfaitement par les résultats pédologiques puisque l'horizon de surface est caractérisé par une faible densité, une forte porosité, en liaison avec la composition botanique dont la fraction fibreuse est constituée principalement de macroagrégats. Plus en profondeur, la tourbe est nettement moins aérée, avec une teneur en sphaignes très importante et une structure nettement plus fine (forte diminution des grandes fibres, absence de pièces constitutives herbacées allongées). Comme le dit HILLEL (1971, in AHTI, 1987), l'écoulement est ralenti et provoque une accumulation temporaire de l'eau dans les couches supérieures, avant que l'équilibre puisse se faire.

Dans le touradon, les mouvements verticaux sont favorisés et uniformisés par l'architecture même de la souche et la présence des faisceaux foliaires et des racines. Il est intéressant de noter que la loupe racinaire principale se situe à la limite supérieure de la zone de battement de la nappe de fond mais que l'on trouve des racines dans l'horizon continuellement immergé. Le fonctionnement différencié entre surface et profondeur, lié aux modifications des conditions structurales du sol permet de suggérer une analogie fonctionnelle avec l'acrotelme et la catotelme (par analogie à la définition donnée par INGRAM (1978)) et ce, malgré l'absence de la matrice végétale en croissance.

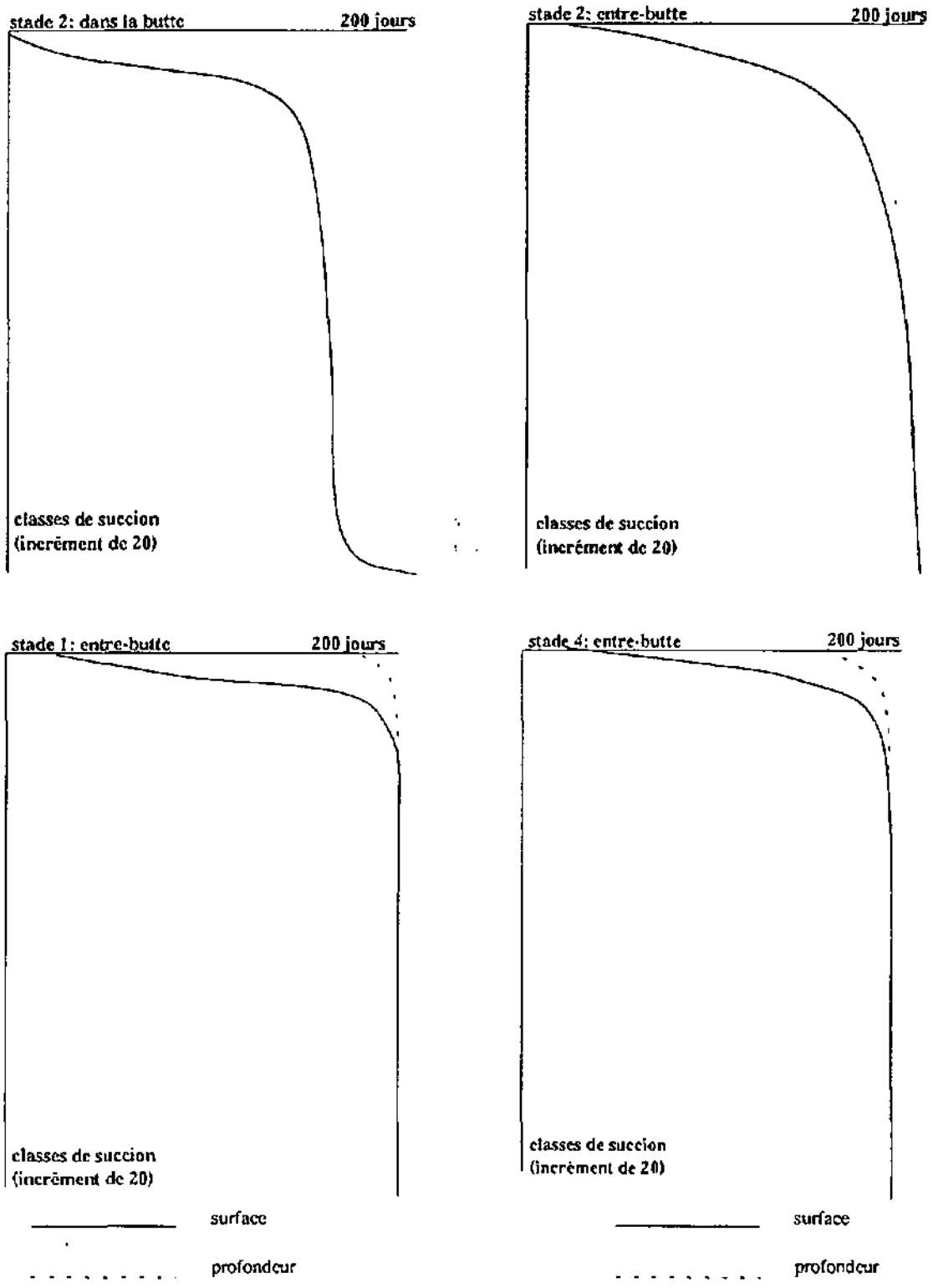
5.2.2.2. Les courbes de dépassement permanent de la nappe

Les courbes de dépassement permanent significatives ont été rassemblées sur la figure 62. Elle permet la comparaison directe des types de lignes.

Pour le premier stade, nous avons figuré les courbes de la butte et de la tourbe dénudée. Elles montrent également la différence entre le fonctionnement du touradon et celui du sol sur lequel il se développe. Ces courbes confirment l'uniformité de fonctionnement des trois niveaux de mesures dans la butte (3 lignes superposées) et la différence de comportement entre surface et profondeur pour le sol tourbeux (2 lignes distinctes).

Pour les stades 2, 3 et 4 de La Chaux-d'Abel, nous limitons les courbes à la situations de l'entre-butte. Dans les touradons, les piézomètres de surface donnent la même image que pour les profondeurs équivalentes des zones ouvertes alors que les mesures de profondeur présentent des courbes très diverses, visiblement liées à l'architecture propre de chaque butte. Aucune comparaison n'est dès lors possible. Pour les surfaces ouvertes, nous constatons une nette

Figure 66: Représentation schématique de quelques courbes de dépassement permanent pour les valeurs de succion, Série des touradons



uniformité des caractéristiques hydriques dans les horizons de surface, qui présentent très peu de jours avec une nappe, puis une absence totale d'eau libre. Cette caractéristique est la même, qu'il y ait des sphaignes (stades 3 et 4) ou que le sol soit dénudé. Les mesures de profondeur par contre montrent une nette évolution avec une absence totale de nappe pour le stade 2, une apparition moyennement longue et profonde pour le stade 3 et une présence longue et proche de la surface pour la masse tourbeuse du stade 4. Pour ce dernier stade, l'échantillonnage effectué au contact du substrat minéral indique une absence totale d'eau libre, tout au long de la saison. Ces résultats confirment l'existence temporaire de nappes perchées indépendantes, pour les trois stades. Elles sont ici de très courte durée et étroitement liée à l'abondance des pluies temporaires. Pour le stade 4, il y a formation d'une nappe libre dans la masse principale de tourbe (niveau de prélèvements à 20-25 cm) placée au-dessus d'un horizon dépourvu d'eau libre. Pédologiquement, la nappe est mise en évidence dans l'horizon fibreux (56%), dont la fraction fibreuse est constituée de 35% de macroagrégats. L'horizon sous-jacent, dépourvu de nappe libre est l'horizon tourbeux mésique (35%), au contact avec le sol argilo-limoneux, de structure pâteuse, avec 15% de macroagrégats dans la fraction fibreuse.

5.2.2.3. Les variations saisonnières de la succion

Comme pour les nappes, la mesure de la succion renseigne différemment d'un stade à l'autre. Pour le premier stade, les variations sont très faibles et non significatives entre touradons et tourbe dénudée. Les valeurs sont parfaitement corrélées à la fluctuation de la nappe, ce qui n'est pas surprenant vu sa position proche de la surface.

Pour les stades de La Chaux-d'Abel, la mesure de la succion dans le sol a fourni, outre les valeurs les plus importantes, une différenciation très intéressante entre les stades. Les courbes de variations pour les entre-buttes des stades 2, 3 et 4 sont illustrées aux figures 63, 64 et 65. Nous ne figurons que les situations d'entre-buttes car les touradons eux-mêmes ont fourni des courbes similaires, avec une plus nette augmentation des valeurs pendant le mois de septembre pour les horizons de surface (550 cm d'eau au stade 2 le 15 septembre).

Les figures mettent en évidence une différenciation surface-profondeur du stade 2 au stade 4. Pour le stade 2, les tensiomètres évoluent pour les deux profondeurs en parallèle, tout au long de l'année. La succion mesurée comme nulle le 15 avril pour la surface indique une saturation de l'horizon. Cet événement est à mettre en relation avec la courbe de dépassement permanent de la nappe qui indique la présence sporadique d'une nappe dans cet horizon. A noter que pour la même date, les tensiomètres de profondeur enregistrent une faible succion. Cette valeur, bien que très peu importante, est corrélée également à la courbe de dépassement permanent de la nappe.

Avec le stade 3 la différenciation surface-profondeur se marque. On retrouve l'événement pluviométrique du 15 avril et la saturation de la surface. Pour la profondeur, il y a saturation une longue partie de la saison. Le stade 4 présente une fluctuation parfaitement similaire pour l'horizon de surface. Pour la profondeur, l'horizon moyen comme l'horizon de fond, au contact du substrat minéral, présentent de longues périodes dont la valeur de succion nulle indique une saturation totale du sol. Il y a ici une nette divergence par rapport aux courbes de dépassement permanent de la nappe. Déjà au stade 3, la durée de la période de saturation est plus longue que la période avec une présence de nappe libre. Pour le stade 4, la différence est encore plus marquée. Pour la profondeur moyenne, correspondant à l'horizon fibreux, la période de saturation est la même que pour le stade 3 alors que la comparaison des courbes de dépassement permanent indique une plus

Figure 67: Variations saisonnières du niveau de la nappe

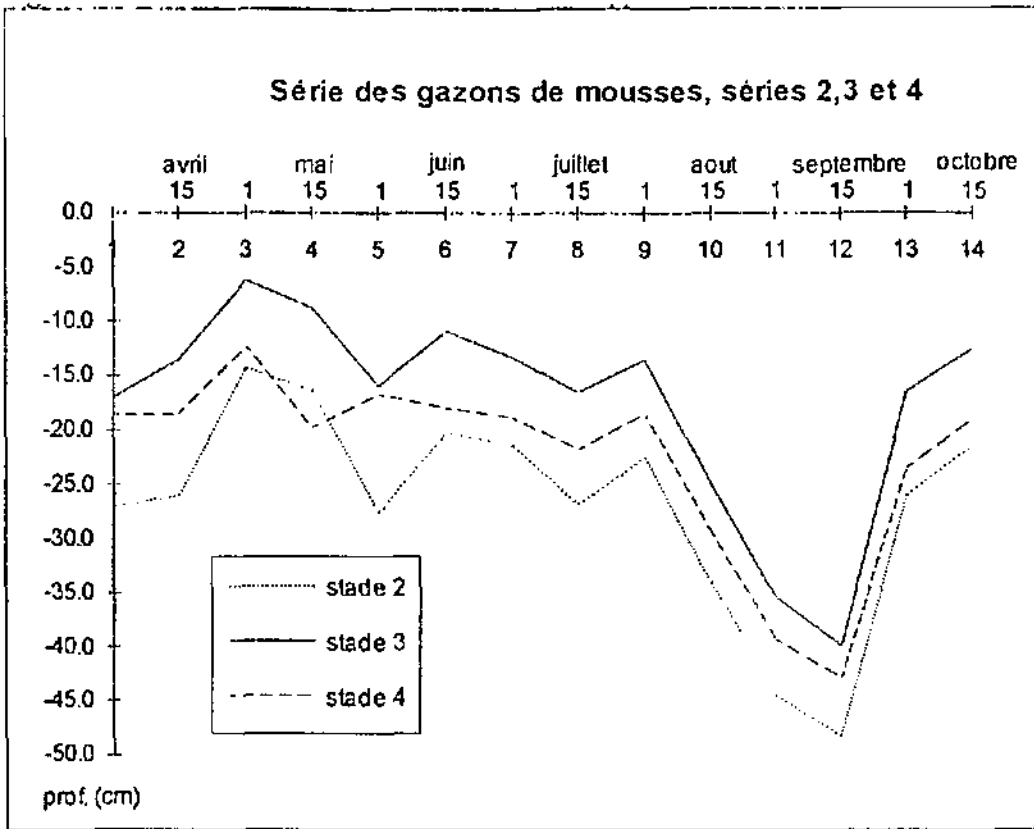


Figure 68: Représentation schématique de la courbe de dépassement permanent de la nappe phréatique pour la série des gazons de mousses

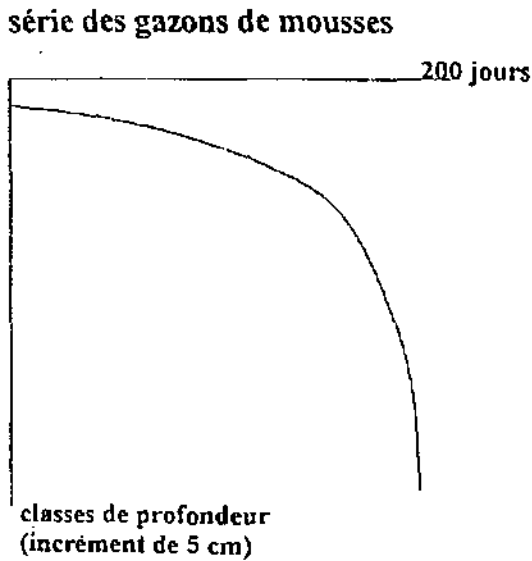


Figure 68: Représentation schématique d'une courbe de dépassement permanent de la nappe, Série des gazons de mousses

longue période avec nappe libre pour le stade 4. L'horizon mésique de profondeur est lui aussi assez régulièrement saturé alors qu'aucune nappe n' a été décelée.

Les tensiomètres permettent donc clairement de mettre en évidence la présence d'une zone saturée en eau, aux caractéristiques hydriques identiques à celle d'une frange capillaire, mais sans le contact de celle-ci avec une nappe d'eau libre permettant les remontées. Il y a ici saturation du sol, en liaison avec la texture et la structure de l'horizon pédologique concerné.

Considérant les valeurs de succion mesurées, toujours très faibles, l'accessibilité de l'eau pour les plantes n'est pas compromise par les forces de rétention. Les nappes perchées ne sont que très temporaires puisque l'eau reste, selon les classes de succion de BUCHTER (1984), facilement drainable.

5.2.2.4. Les courbes de dépassement permanent pour la succion

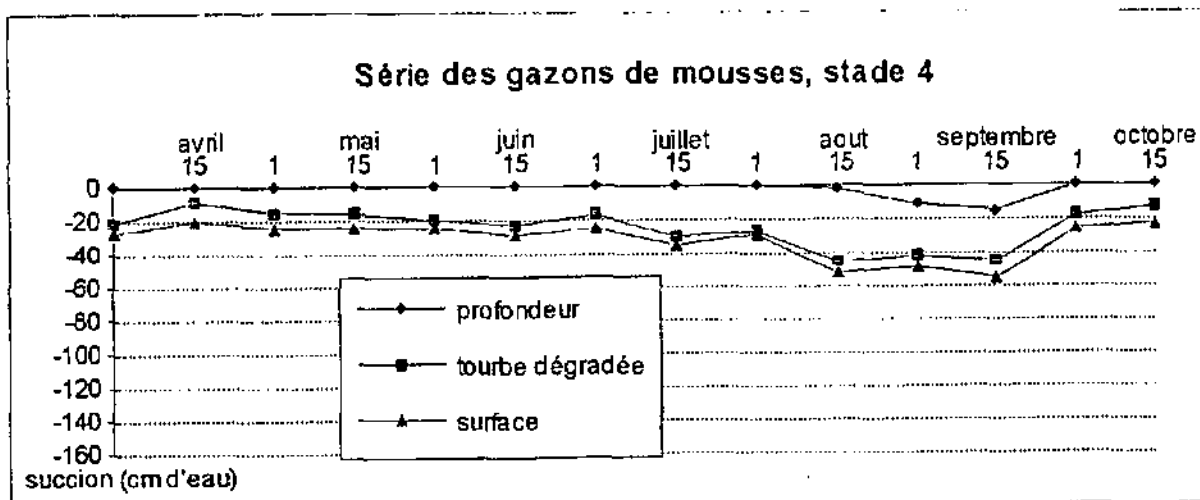
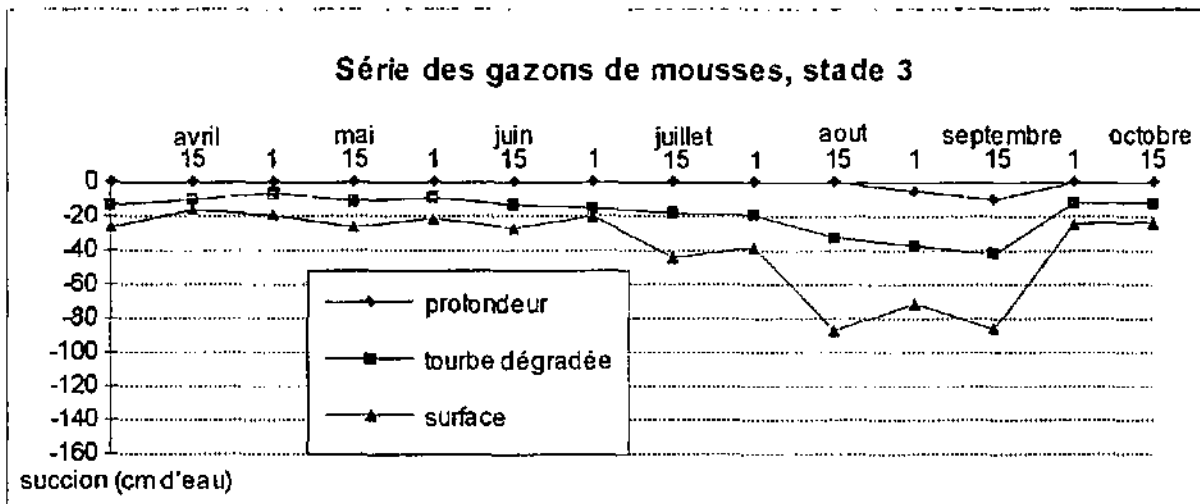
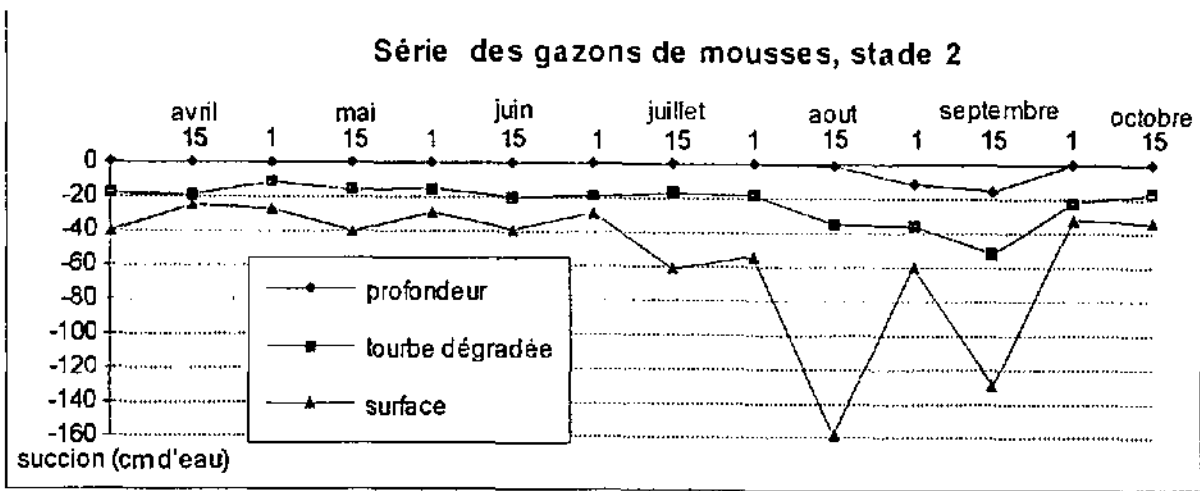
Les courbes pour la succion sont nettement moins différenciées que pour la nappe. Nous pouvons distinguer 4 types, principalement grâce aux caractéristiques particulières du stade 2, très extrêmes. La figure 66 illustre ces types. Il y a analogie entre les stades 1, 3 et 4 aussi bien pour les touradons que pour les surfaces ouvertes. Les courbes sont assez planes et situées dans les classes de très faible succion, indiquant une longue période de succion uniforme puis une baisse de courte durée. L'horizon profond a une courbe formant un angle presque droit entre l'horizontale du niveau 0 (succion absente) et quelques jours de faible succion. Le stade 2, pour la tourbe dénudée, est le seul qui illustre une courbe convexe, déplacée un peu vers le bas et attestant de succions moyennes à fortes. Pour le touradon, la forme convexo-concave indique deux niveaux préférentiels, avec de faible succion et, sans transition, l'apparition de valeurs extrêmes. Les types de courbes définies par AEBY (1990) sont parfaitement similaires à notre type principal. Ses points de mesures situés à proximité immédiate des drains présentent une image identique à notre stade 2, ce qui confirme l'influence marquée du drainage pour ce stade, et le fort assèchement saisonnier.

5.2.3. Série des gazons de mousses

Pour la série des gazons de mousses, nous avons été contraints d'abandonner les mesures hydrodynamiques pour le premier stade à Martel-Dernier. La raison est essentiellement d'ordre politique et liée à la destruction de nos systèmes de mesures par les propriétaires des terrains farouchement hostiles aux protecteurs de la nature, scientifiques et militants d'associations confondus. Nous n'avons donc aucune information quant aux nappes de ce stade.

Pour les stades 2,3 et 4, tous situés en terrain accessible au marais du Cachot, la qualité des mesures est directement dépendante des contraintes pédologiques. Comme le montrent les profils des figures 41, 42 et 43, la caractéristique majeure de cette série s'exprime par la formation d'un petit horizon fortement dégradé, posé sur une tourbe en place très épaisse. Au-dessus, un épais tapis de *Polytrichum strictum* couvre le sol avec, selon les stades, une proportion de sphaignes assez diverse. Le but visé par l'étude hydrodynamique était de cerner le rôle de l'horizon dégradé et, plus précisément, de chercher à mettre en évidence un éventuel effet barrage, par la création d'une nappe perchée au niveau de la surface et du tapis muscinal. Pour ce faire, les niveaux de mesures des piézomètres et tensiomètres ont été plantés en surface dans le feutrage (0 à 5 cm), dans l'horizon dégradé (entre 10 et 20 cm environ) et en profondeur (50 à 55 cm) dans la masse tourbeuse

Figures 69, 70 et 71: Variations saisonnières des succions



initiale. Comme pour les mesures de la compaction de la tourbe, la très faible épaisseur des deux horizons de surface (3 à 5 cm) a rendu l'installation et la fiabilité des mesures délicates.

5.2.3.1. Les variations saisonnières de la nappe

Les tubes piézométriques n'ont enregistré aucune nappe libre dans ces horizons de surface. En profondeur, une nappe a été continuellement notée dans les trois stades, avec un comportement saisonnier parfaitement comparable. Il est intéressant de noter que sa profondeur moyenne est de -27 cm pour le stade 2 (illustré sur la figure 67) et déjà de -17.5 cm pour le stade 3, légèrement moins proche du mur. Les épaisseurs des deux horizons de surface étant similaires et les sites au même niveau altitudinal, il y a bien une nappe généralement plus profonde au deuxième stade. Pour le stade 4, la nappe est mesurée à -23 cm de moyenne, Compte tenu de l'épaisseur plus importante du tapis muscinal, au-dessus de l'horizon de dégradation, la profondeur relative n'est pas plus grande qu'au stade 3, voire moins. Pour le stade 2, le sommet de la surface piézométrique est située régulièrement sous l'horizon dégradé. Pendant notre période de recherches, il a été atteint à sa base uniquement une fois, au printemps. Pour le stade 3, les fluctuations saisonnières concernent nettement plus l'horizon noir qui est assez régulièrement imbibé voir totalement inondé. Ce fait est encore plus flagrant au quatrième stade. Les fluctuations sont assez importantes (-10 à -50 cm) mais correspondent parfaitement à celles mise en évidence au niveau des "landes" relonisant les marais secondaires élevés (BUTTLER & CORNALI, 1983, MULHAUSER, 1989, AEBY, 1990). GEIGER (1980), dans son étude phytosociologique des landes du Cachot indique une profondeur de nappe de 70 cm pour les faciès à *Polytrichum strictum* et *Calluna vulgaris* et le gradient d'approfondissement en relation avec la proximité du mur. Il considère que le niveau hydrique est un facteur primordial pour la répartition des faciès.

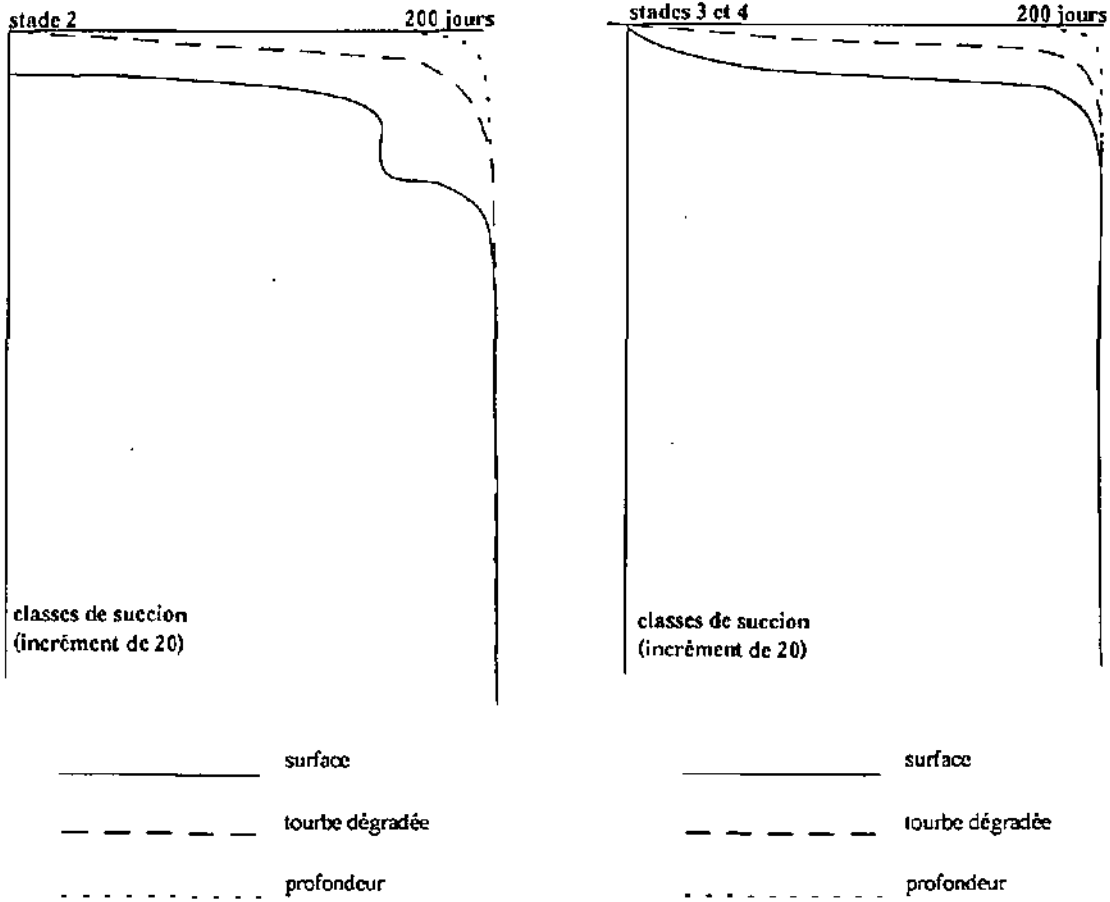
Pour cette série, toutes les courbes de dépassement permanent de la nappe présentent une forme similaire. La courbe de l'horizon de profondeur est illustrée à la figure 68. Elle est de forme convexe, attestant la dominance des niveaux supérieurs.

5.2.3.2. Les variations saisonnières de la succion

Les tensiomètres nous ont fourni des résultats pour les horizons de surface. Les figures 69, 70 et 71 illustrent les variations de la succion pour les trois profondeurs de chaque stade. Seules les valeurs de la surface, pour les tensiomètres plantés au sein même du feutrage muscinal, présentent une évolution d'un stade à l'autre. Il y a une nette diminution de la succion du stade 2 au stade 4 avec, pour ce dernier, le nivellement total des différences entre la surface muscinale et l'horizon dégradé. Les valeurs mesurées sont basses. En les comparant aux mesures des horizons de surface (tourbe dénudée) de la série des touradons, nous constatons une parfaite concordance des valeurs et ce, pour chacun des stades.

Le tapis de Polytrics réagit à la sécheresse de la même manière que la tourbe nue. L'apparition des sphaignes, qu'elles soient posées sur le sol en coussinets ou intégrées dans l'architecture muscinale, provoque une augmentation de l'humidité du sol identique d'une série à l'autre. Les courbes de dépassement permanent de la succion, présentées à la figure 72 montrent une forme plane similaire au type principal de la série des touradons, ce qui est normal vu la similitude marquée des valeurs et évolutions saisonnières. Le stade 2 présente une courbe à deux paliers, comme pour le touradon du deuxième stade de la série précédente. Néanmoins, le second palier illustre ici de nettement moins grandes valeurs. Il y a également un saut rapide entre les deux niveaux préférentiels définis par chaque palier.

Figure 72: Représentation schématique de quelques courbes de dépassement permanent pour les valeurs de succion, Série des gazons de mousses



Contrairement à la série des touradons, le quatrième stade ne permet pas de mettre en évidence une saturation des horizons par stockage ou remontée capillaire et ce, malgré la présence de la nappe d'eau libre à proximité. En fait, cette série présente un net contraste hydrique entre la masse de tourbe totalement saturée et les horizons de surface. La nappe étant haute, avec un sommet à proximité immédiate d'horizons très poreux constitués, en surface, de structures vivantes, la saturation hydrique de ces derniers peut être empêchée uniquement par la forte évapotranspiration du tapis muscinal, dont l'effet de pompe se marque jusqu'au sommet de la nappe. La présence de celle-ci apparaît par contre comme fondamentale pour garantir le maintien de succions faibles même en période de sécheresse et ce, par une assez bonne compensation de l'évapotranspiration de surface. Cette observation appuie les résultats de GEIGER (1980) quant à l'importance de la profondeur de la nappe sur la répartition des faciès de lande.

5.2.4. Série des marais tremblants

Le dynamisme végétal de la série des marais tremblants est directement dépendant des niveaux et fluctuations hydriques. Il n'est dès lors pas surprenant d'avoir décelé, tout au long de la saison, la présence d'une nappe proche de la surface, ayant des fluctuations peu importantes. Le choix d'implantation de nos tubes piézométriques et tensiométriques a été dirigé par la volonté de mise en évidence de l'évolution des conditions hydriques immédiatement sous la surface. Nous avons cherché à estimer les modifications intervenant éventuellement au sein des buttes à sphaignes qui commencent à se différencier de stade en stade. Comme pour la série des gazons muscinaux, nous avons planté nos instruments directement dans la masse de sphaignes, au niveau des tiges mortes (5 cm de profondeur) puis, dans la litière muscinale, entre 10 et 20 cm selon les stades. Enfin, la profondeur est limitée à 30-60 cm. Ces choix se sont révélés adéquats puisque les modifications les plus significatives concernent les deux premières profondeurs. Les piézomètres du fond permettent ainsi régulièrement une mesure des fluctuations de la nappe libre permanente (les tensiomètres sont alors totalement inopportuns) alors qu'en surface, l'abaissement de la nappe a été suffisante pour vider les piézomètres plus ou moins temporairement, assurant la mesure d'une tension capillaire.

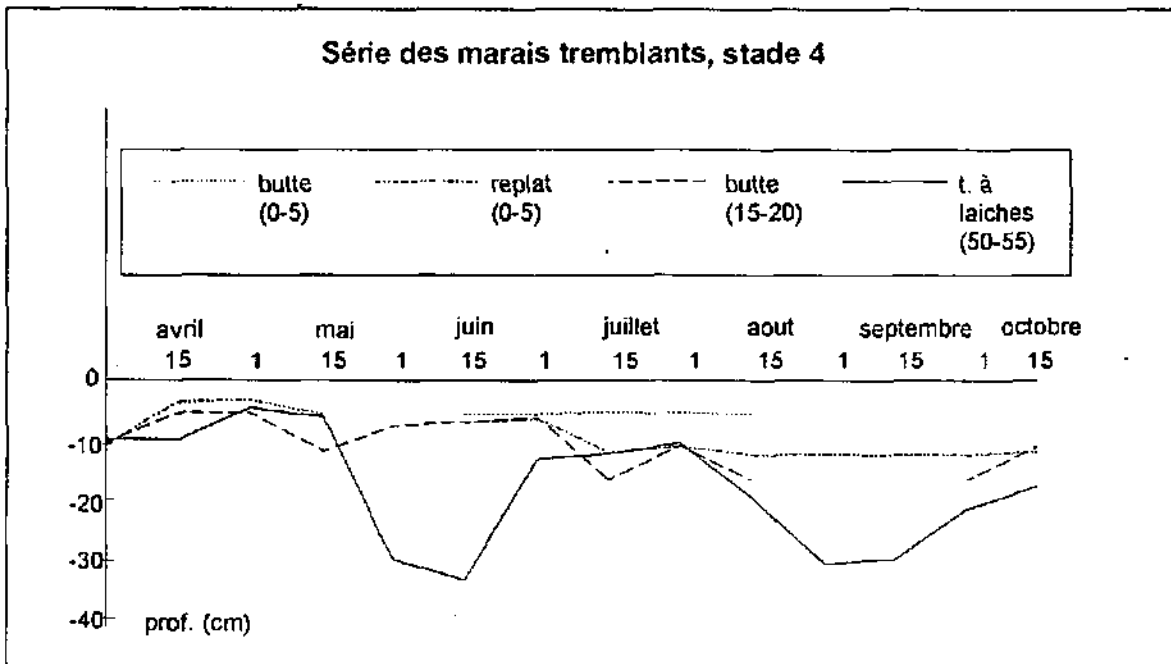
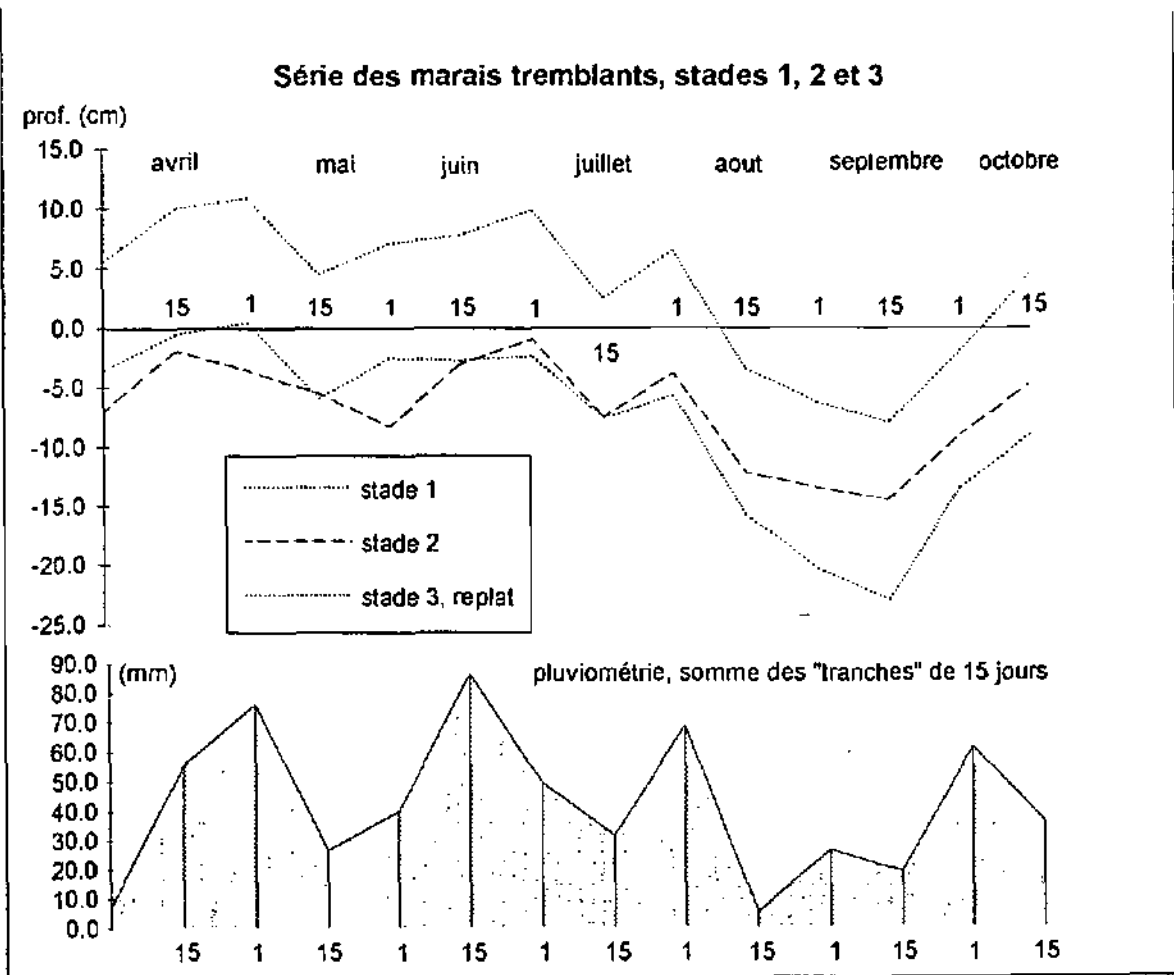
5.2.4.1. Les variations saisonnières de la nappe

Les figures 73 et 74 illustrent les courbes de variations des nappes des 4 stades. Pour les trois premiers stades, il n'y a aucune différence entre la surface et la profondeur. Nous n'avons donc figuré qu'une courbe (fig. 73).

Le premier stade est totalement inondé tout au long de la saison de végétation avec une profondeur moyenne au-dessus du sol (+3,5 cm). Il n'y a pas de disparition de l'eau des gouilles et mares qu'au cours de la période de sécheresse des mois d'août et septembre. Les fluctuations mesurées sont de l'ordre de 15 cm (+10 à -5 cm).

La courbe du stade 2 a exactement la même forme que la précédente. Le troisième stade, localisé dans une fosse voisine présente des fluctuations plus importantes (+1 à -23 cm) avec une moyenne à différencier entre le replat à *Sphagnum angustifolium* (-8 cm) et la jeune butte à *Sphagnum magellanicum* (-20 cm). Ce fait indique que la surface piézométrique de la nappe est plane et que la partie sommitale des sphaignes de la butte est plus souvent au-dessus de la nappe libre.

Figure 73: Variations saisonnières du niveau de la nappe



L'image de la courbe du stade 3 est un peu différente au cours de la saison que celle des stades 1 et 2. Nous interprétons ce fait comme une signature du type d'alimentation en eau dans les fosses de la tourbière de Bellelay. L'alimentation est double, avec un apport pluvial, identique d'une fosse à l'autre (distante de 50 mètres environ) et un apport par ruissellement, dépendant de la qualité du sol et de la topographie en amont. Pour le stade 3, il semble qu'il y ait un ruissellement plus important au printemps puis un tarissement plus marqué. Les épaisseurs relatives de tourbe régénérée, entre les deux fosses peuvent expliquer cette différence. Avec 70 cm d'épaisseur de tourbe jeune, les stades 1 et 2 reçoivent et écoulent plus facilement l'eau que le stade 3 qui n'a que 40-45 cm de tourbe très lâche.

La figure 74 illustre les variations du quatrième stade. Avec ce cas, nous pouvons démontrer la différence de fonctionnement hydrique entre la tourbe jeune et l'ancienne tourbe à laïches. Les piézomètres de profondeur, plantés à 50-55 cm sous la surface mesurent les fluctuations au sein de l'ancienne tourbe. La courbe évolue de manière indépendante de celle illustrant le fonctionnement hydrique de la masse de tourbe jeune de surface. En juin, il y a abaissement marqué du niveau dans la tourbe à laïche alors que dans la tourbe jeune, nous mettons en évidence une nappe libre aux fluctuations similaires à celle des stades 1, 2 et 3. Cette mesure est effectuée au niveau de la butte. Deux courbes discontinues concernent les piézomètres de surface, plantés dans les tapis de sphaignes de la butte et du replat. Elles se distinguent assez nettement des mesures effectuées à la base de la tourbe jeune à 10-15 cm sous le sol. *Ces résultats apparaissent comme douteux à l'analyse et indiquent les limites de l'utilisation de piézomètres dans des milieux si jeunes ou la notion de sol est encore très relative.* Par similitude avec la série des gazons de mousses et considérant les valeurs fournies par nos tensiomètres, nous devons admettre **une absence de nappe libre au niveau des horizons de surface**, dont les caractéristiques hydriques sont essentiellement influencées par les mouvements capillaires (c.f. également § 5.2.4.3.). La présence d'eau dans les tubes ne correspond pas réellement à la présence d'une nappe libre, saturant complètement le tapis de sphaignes.

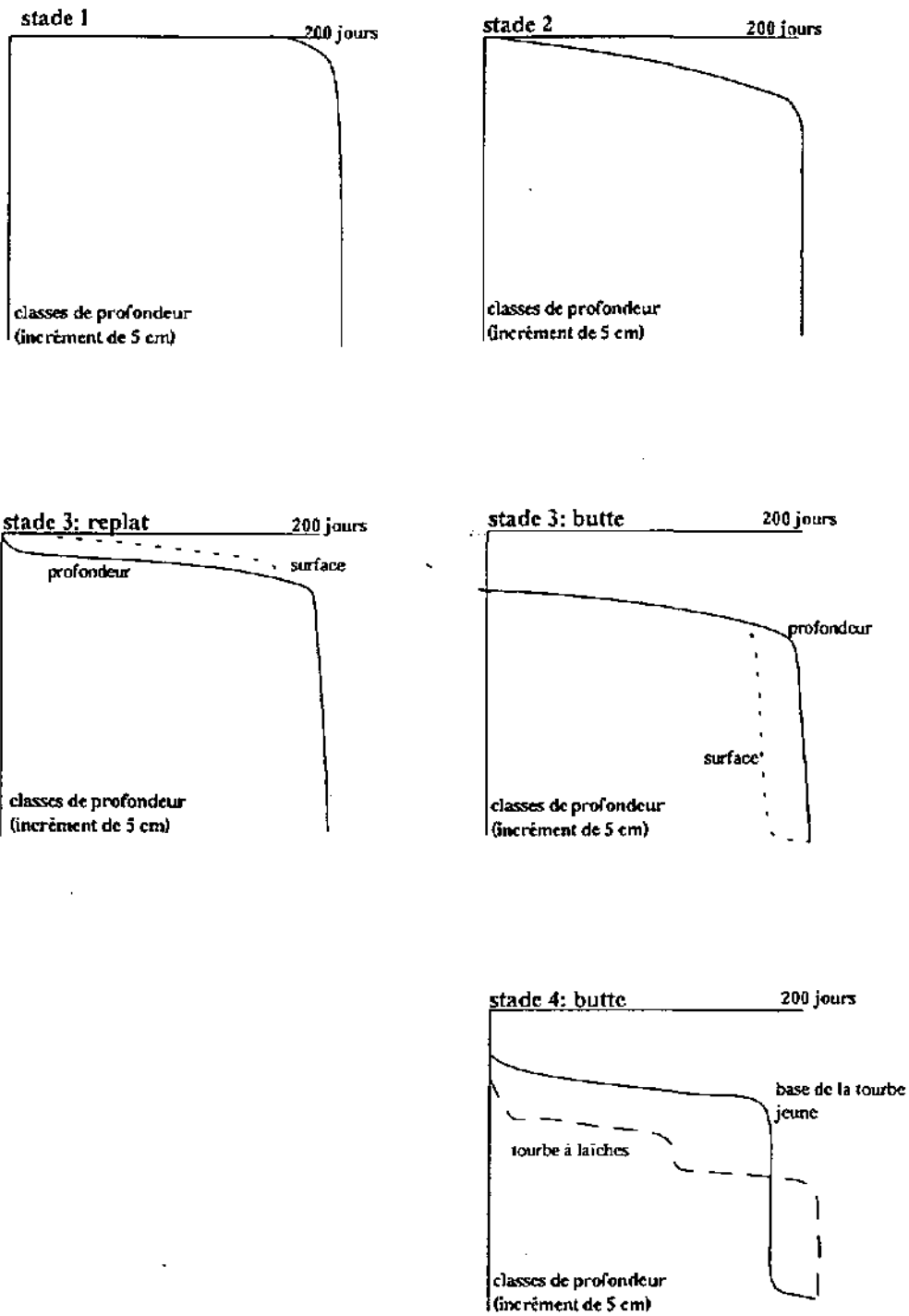
5.2.4.2. Les courbes de dépassement permanent de la nappe

Les courbes illustrées schématiquement sur la figure 75 montrent l'évolution générale du stade 1 au stade 4. **Il n'y a aucune différenciation surface-profondeur pour les deux premiers stades**, avec des courbes planes attestant d'un niveau préférentiel constant. Le stade 3 présente des courbes de type similaire, avec une différence de profondeur du niveau moyen, entre la butte et le replat, liée à la position relative de la nappe par rapport à la microtopographie du sol. Une période d'assèchement apparaît au niveau de la surface de la butte. Pour le stade 4, les courbes distinguent parfaitement la nappe liée à l'ancienne tourbe avec deux niveaux préférentiels et la courbe liée à la tourbe jeune.

5.2.4.3. Les variations saisonnières de la succion

Seuls les tensiomètres des stades 3 et 4 nous ont fourni une valeur significative de succion. Les courbes du stade 3 sont bien corrélées aux mouvements de la nappe (fig. 76), avec une succion plus marquée pour la surface que pour la litière de sphaignes sous-jacente. Pour le stade 4, les variations mesurées entre la surface de la butte et celle du replat sont similaires aussi bien pour les fluctuations que pour les valeurs. Nous n'avons ainsi figuré que la butte (fig 77) pour laquelle des tensiomètres ont été plantés également dans la litière de mousses et à la base de la tourbe jeune. Ce résultat confirme l'hypothèse de données piézométriques douteuses pour la surface du replat lors de la mise en évidence d'une nappe en juillet et août. Les résultats piézométriques de surface

Figure 75: Représentation schématique de quelques courbes de dépassement permanent de la nappe phréatique, Série des marais tremblants



dans la butte se révèle tout autant douteux à l'analyse des résultats tensiométriques. En effet, *le comportement des tensiomètres de surface est en relation avec les mouvements de la nappe de base dans la tourbe jeune et expriment une tension capillaire négative tout au long de la saison, ce qui contredit totalement l'existence temporaire d'une nappe à ce niveau.* Les courbes de dépassement permanent de la succion confirment l'évolution entre les stades. Pour les stades 3 et 4 elles sont du même type que pour les stades équivalents des deux séries "terrestres". Ces courbes sont exprimées à la figure et n'appellent aucun commentaire supplémentaire.

5.2.5. Discussions et classification

Malgré le faible nombre de mesures et certaines lacunes, l'étude des caractères hydrodynamiques a permis de montrer l'évolution au sein de chaque série, avec une différenciation des courbes de dépassement permanent de la nappe et de la succion. De plus, le particularisme de quelques stades a également bien été mis en évidence par le choix adéquat des profondeurs d'échantillonnage. *A priori*, le fait de ne disposer que d'une saison de mesures pouvait apparaître comme un handicap pour l'interprétation des séries de mesures et des courbes. *A posteriori*, une fois l'analyse menée à terme, l'attente d'une description détaillée des profils pédologiques apparaît comme judicieuse et parfaitement justifiée vu l'hétérogénéité importante des conditions rencontrées dans les sols. Dans les milieux secondaires, actuellement en phase d'évolution rapide, **mettre en relation le fonctionnement hydrique et l'architecture pédologique est un exercice délicat vu la faible épaisseur des horizons significatifs**, les influences du drainage, et le matériel adapté bien souvent à des conditions standards et homogènes. Face à ces difficultés, nous considérons que la qualité des sites d'implantation, en relation avec les horizons pédologiques, compense largement la faible période de mesures.

Les résultats présentés doivent être interprétés et surtout extrapolés avec prudence. Ils illustrent en détail des stations de mesures particulières. Néanmoins, vu les tendances qui se marquent, et sans tenir compte trop impérativement des chiffres fournis, il semble possible de **dégager quelques caractères évolutifs**. Une étude spécifique serait à envisager sur une plus longue période et dans un plus grand nombre de stations afin de cerner avec précision l'hydrodynamique de ces séries.

L'étude hydrodynamique met en évidence une **nette convergence de fonctionnement des nappes**. A partir de conditions initiales très diverses, différenciant très nettement chaque série, les caractères hydrodynamiques évoluent vers un système unique rassemblant les stades ultimes des trois séries.

Abstraction faite de son premier stade, sur lequel nous reviendrons, la série des touradons est caractérisée par des conditions extrêmes, avec une absence de nappe libre permanente et un sol très peu profond. Bien qu'il ne soit pas possible, sur la base des résultats d'hydrodynamique, de définir si la série est génétique ou topographique, les caractères hydriques sont différents à chaque stade et en relation étroite avec le degré de couverture des sphaignes et le dynamisme de celles-ci.

Figure 76: Variations saisonnières des succions

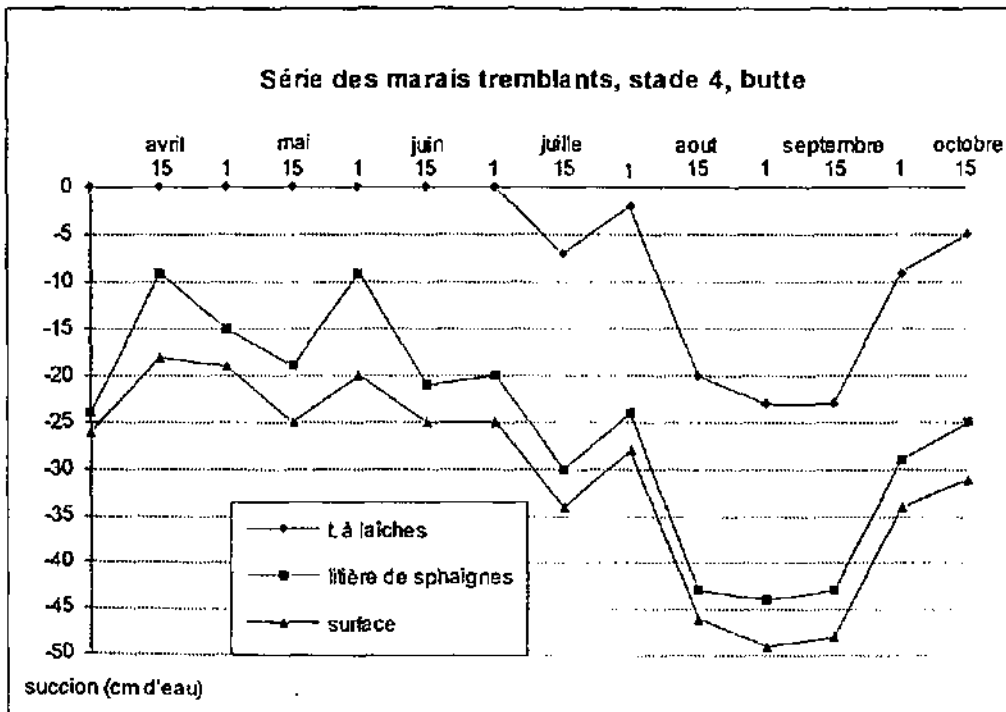
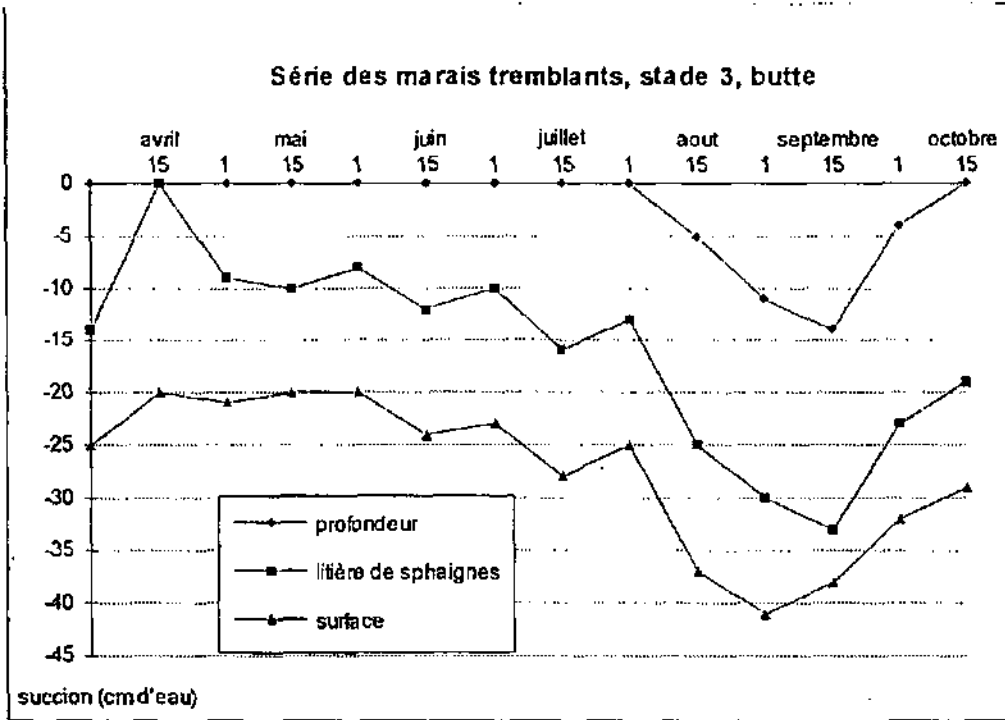


Figure 77: Variations saisonnières des succions

La série des gazons muscinaux possède actuellement une nappe permanente assez proche de la surface dès le stade 2. Il est fort probable que, pour cette série, le fait d'avoir fermé les canaux de drainage ainsi que la présence très proche de la pinède primaire a suffi à accélérer la recolonisation du tapis de *Polytrichum strictum* qui offre au Cachot l'image d'un gazon continu alors qu'à Martel-Dernier, sans la réserve hydrique, le sol reste principalement nu, avec quelques coussinets pionniers. La profondeur de la nappe donnée par GEIGER (1980) pour les faciès à Polytrichs est de 70 cm. Il y a donc eu un net rehaussement de la nappe sous l'action des travaux de colmatage des rigoles de drainage puisque nous mesurons cette nappe à -20 cm. Si GEIGER avait mesuré les fluctuations à proximité immédiate du mur, ses valeurs n'en demeurent pas moins actuelles et la végétation très pionnière et éparse, avec une physionomie identique au premier stade décrit indique clairement la limitation imposée par une nappe profonde. Nous ne possédons malheureusement pas l'information nécessaire pour trancher. L'épaisseur de tourbe résiduelle et la présence de la nappe différencient nettement les premiers stades des deux séries "terrestres".

Pour la série des marais tremblants, l'accumulation en excès de l'eau dans les fosses d'exploitation est au contraire le facteur limitant de la recolonisation végétale des premiers stades. Pour cette série, l'évolution génétique est peut-être la plus évidente, bien que nos stades offrent actuellement des phases très diverses de l'évolution supposées. Les différences de dynamisme entre les fosses sont principalement imposées par

- la complémentarité entre l'architecture initiale de la fosse,
- la qualité des eaux d'écoulement,
- l'épaisseur de la tourbe abandonnée et, bien entendu,
- le volume et la stabilité de l'eau de la nappe.

Au stade 4 de chaque série, une nappe existe sous le tapis de sphaignes qui se différencie entre replats et buttes. Cette nappe est caractérisée par les mêmes types de courbes de dépassement permanent et les mêmes fluctuations saisonnières générales. Pour les tensions capillaires, les variations sont identiques d'une série à l'autre alors qu'il y a convergence des valeurs mesurées.

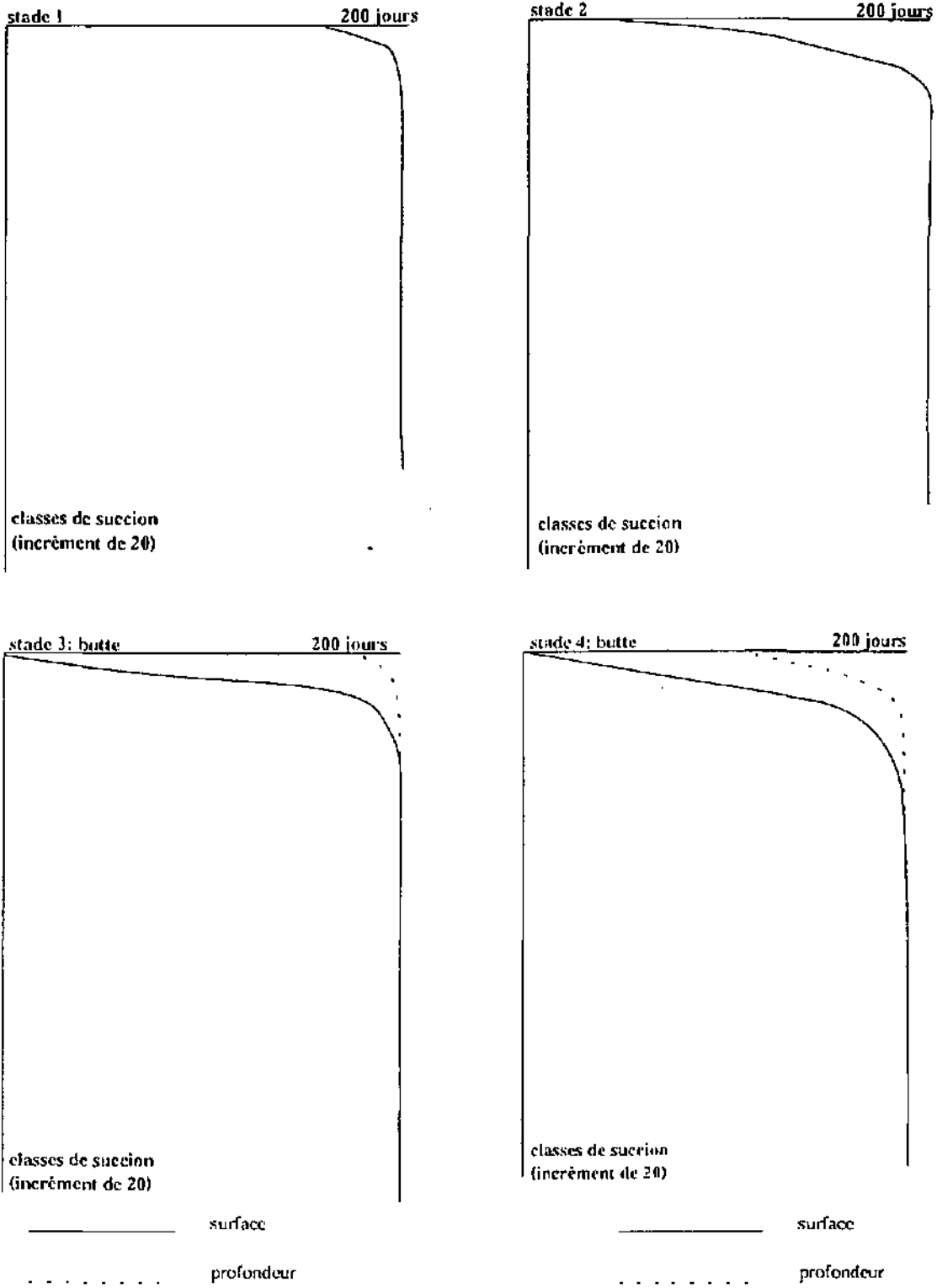
Pour les séries terrestres, les valeurs de succion en surface diminuent régulièrement d'un stade à l'autre alors que pour la série aquatique, la succion commence à se marquer avec les derniers stades. Pour les trois stades finaux, les valeurs enregistrées pendant la période la plus extrême sont limitées à environs 50 cm d'eau. Avec une période de succion assez similaire et des valeurs aussi proches, les courbes de dépassement permanent de la succion sont de type identique pour ces trois stades.

Le premier stade de la série des touradons présente les mêmes caractéristiques hydriques que les stades finaux alors que sa physionomie correspond sans conteste à un stade encore initial de régénération. Par l'absence de couverture sphagnale, le site des Pontins montre clairement que ...

... la présence des sphaignes ne suffit pas à elle seule à expliquer la convergence de fonctionnement des nappes pour les trois séries.

Nous considérons au contraire que les sphaignes profitent favorablement des conditions hydriques offertes par le milieu sans que celles-ci puissent à elles seules diriger le dynamisme de la régénération.

Figure 78: Représentation schématique de quelques courbes de dépassement permanent pour les valeurs de succion, Série des marais tremblants



6. CLIMATOLOGIE

6.1. CARACTERISTIQUES GENERALES DU CLIMAT EN 1991

6.1.1. Introduction

Il est connu de longue date que les tourbières évoluent favorablement dans les régions à climat froid et humide. Il est tout autant connu, du moins en Suisse et en France voisine, que le climat général des vallées internes du Jura correspond fort bien à cette définition, avec des synclinaux et combes anticlinales particulièrement froides. Il n'est dès lors pas surprenant d'y rencontrer de nombreux hauts-marais, régulièrement répartis le long de l'arc jurassien, en fonction des conditions géomorphologiques (GERBER, 1989).

Le climat général des hautes vallées neuchâtelaises a fait l'objet de descriptions fouillées depuis le début du siècle (SPINNER 1927 et 1932, BURGER 1959, MATTHEY W., 1971). Le climat des hauts-marais est également décrit par MATTHEY W. (1971) pour le site du Cachot, alors que de nombreux aspects micrométéorologiques ont été abordés pour les hauts-marais jurassiens par MATTHEY W. (1964 et 1971) et AUROI (1975).

La synthèse de FRENZEL (1983) permet de faire le point sur les informations fournies par les marais eux-mêmes en tant qu'indicateurs des conditions climatiques passées, par la palynologie et la stratigraphie (BARBER 1981). TALLIS (1983), dans le même ouvrage de synthèse, rassemble les données sur les successions évolutives des différents types de marais en discutant les relations entre climat et évolution végétale. Dans le même ordre d'idée, FRENZEL (1983) discute les relations de "feed-back" entre climat et autorégulation dans l'évolution des hauts-marais en intégrant les influences anthropiques comme facteurs de modifications des successions (assèchement, amendement, ...). WALLEN *et al* (1988) formulent l'hypothèse d'une relation entre climat et productivité primaire des sphaignes après la mesure de la productivité sur plusieurs années et la mise en évidence de fortes variations annuelles. BACKEUS (1988) utilise la structure de croissance de *Scirpus caespitosus* au sein des buttes à sphaignes (longueur relative des fragments de tige produits annuellement) pour prédire les changements climatiques du milieu et par conséquent la productivité des sphaignes.

Au niveau européen et nord-américain, les travaux concernant les caractérisations méso- et microclimatiques des tourbières ou de certains milieux tourbeux spécifiques sont assez abondants, souvent en relations avec l'écologie générale des sites, la dynamique des nappes phréatiques ou les successions végétales (TINBERGEN 1940, JENSEN 1961, LELOUP & JACQUEMART 1963, SCHMEIDL 1964, 1978, LAINE 1984, MIOUZE 1985, WICKY 1988, FRANCEZ 1990, LUETT 1992). Pour les bas-marais, nous pouvons citer LEON (1968), YERLY (1970) et GIUGNI (1991).

Nous ne reviendrons pas ici sur la description générale du climat des hauts-marais. Par contre, dans l'optique de comprendre la différenciation de nos séries évolutives ainsi que la dynamique des différents stades décrits, nous avons cherché à montrer les particularités de chacun sous l'angle micrométéorologique et en particulier, le rôle du couvert sphagnal face aux facteurs "température", "humidité" et "évaporation" ainsi que celui des couverts protecteurs (touradons, gazons muscinaux) par rapport aux milieux secondaires initiaux totalement nus.

Tableau 27: Données météorologiques générales, La Brévine

Données météorologiques générales pour La Brévine, 1991 et premier semestre 1992
(source: Institut Suisse de Météorologie)

mois	Température de l'air (°C)						Humidité relative (%)			Précipitations (mm)		nombres de jours avec								
	7h	13h	19h	mois		min.	7h	13h	19h	24h.	7h.-19h.	brouillard	rosée	gelée	neige					
				max.	min.															
1991																				
janvier	-7.6	-1.0	-5.3	-5.1	0.4	12.0	-10.1	-25.5	88	85	87	87	90.1	41.7	1				31	
février	-11.3	-0.1	-6.0	-6.6	1.1	9.2	-14.2	-32.8	92	72	88	85	61.1	24.0	7	1			28	
mars	0.7	8.3	3.3	3.5	8.9	15.6	-1.0	-6.1	91	64	85	83	96.7	38.9	3		5	12	12	
avril	-1.3	8.7	4.6	2.9	9.4	18.0	-4.0	-18.0	95	51	68	77	65.5	27.4	3		13	20	4	
mai	4.2	10.8	7.4	5.9	11.3	20.4	-1.2	-6.2	86	58	68	75	90.4	44.4	2	1	14	16	1	
juin	9.4	15.1	12.5	11.0	16.4	24.3	5.5	-2.0	87	58	68	75	201.5	89.5	1		13			
juillet	13.6	21.7	17.7	16.0	22.6	28.3	8.3	-0.2	87	53	68	74	143.8	43.7	2		21			
août	10.4	22.6	17.2	15.4	23.3	30.2	6.1	-1.8	91	42	60	69	25.8	4.0	2		26	2		
septembre	8.3	18.8	12.7	12.6	19.3	23.8	5.5	-1.8	93	56	75	77	165.3	78.0	3		19	1		
octobre	1.0	10.5	4.1	4.6	10.7	20.5	-0.7	-11.3	94	58	85	81	128.7	53.6	7	2	7	8	8	
novembre	-1.0	4.6	-0.2	0.6	5.6	12.2	-3.4	-11.3	91	76	86	86	164.8	84.0	3	2	1	13	11	
décembre	-6.2	1.7	-5.5	-3.8	2.4	8.2	-8.8	-18.4	89	66	87	83	178.9	66.2			20	12		
année	1.7	10.1	5.2	4.8	11.0		-1.5		90	62	77	79	1412.6	595.4	34	3	5	119	92	107
moyenne 1901-66													1424.0							
1992																				
janvier	-10.5	-1.0	-7.0	-6.7	-0.3	9.3	-13.4	-23.2	87	70	85	82	23.1	6.4	5	2	4			30
février	-5.9	3.3	-3.0	-2.6	3.7	10.7	-9.4	-25.2	89	62	85	80	135.2	50.2	3	1				29
mars	-0.7	6.3	1.6	1.8	6.4	11.7	-2.7	-11.0	92	65	85	84	173.8	87.1	1			4		23
avril	1.7	9.8	5.3	4.7	10.1	22.2	-0.9	-7.5	82	53	67	71	178.6	66.7	1	1	2	3	8	9
mai	5.4	17.1	12.4	10.0	17.2	24.5	2.8	-6.0	85	50	65	72	92.7	30.6	1			13		
juin	10.6	16.3	13.1	11.9	17.0	24.2	6.0	1.5	83	61	70	75	149.6	58.7				10		

6.1.2. Méthode

La méthode est décrite en détail au chapitre 1.5. Nous n'y reviendrons pas ici. Nous signalerons uniquement que le climat général de référence pour les hauts-marais est celui fourni par la station de La Brévine. Vu les comparaisons avec les résultats des stations pluviométriques, ces valeurs caractérisent assez bien, par analogie, les sites des Pontins et de Martel-Dernier, mais divergent certainement passablement pour les sites de La Chaux-d'Abel et de Bellelay (plus chauds et moins pluvieux en général). Bien que très proches géographiquement de Martel-Dernier, les tourbières du fond de la vallée de La Brévine évoluent sous un climat passablement différent de celui de la vallée des Ponts-de-Martel (et donc du site de Martel-Dernier). Ces modifications sont exprimées dans le travail de MULHAUSER (1989); elles concernent aussi bien les précipitations (moins importantes) que la température (plus élevée). Ces différences s'expliquent par la topographie générale des deux vallées.

6.1.3. Résultats généraux

Comme l'indique JORNOD (1992), l'année 1991 a été normalement ensoleillée et chaude (un peu excédentaire à Neuchâtel) et plus sèche que la moyenne dans la région jurassienne. Les valeurs pour les stations du Haut-Jura confirment ces résultats avec une température annuelle de 4.8°C à La Brévine (moyenne 1901-60 de 4.7°C, 5.8°C en 1990) et de 6.1°C à La Chaux-de-Fonds (contre 7.0°C en 1990), un ensoleillement de 1885 h (120%) à La Chaux-de-Fonds (1836 h pour 117% en 1990) et des précipitations régulièrement plus basses que la moyenne pour toutes les stations du Jura central. Le tableau 27 présente les résultats mensuels complets pour la station de La Brévine en 1991.

Comme le montrent le climatogramme et les diagrammes ombrothermiques (fig. 79, 80, 81 et 82), les variations interannuelles de températures sont relativement faibles alors que les précipitations varient fortement.

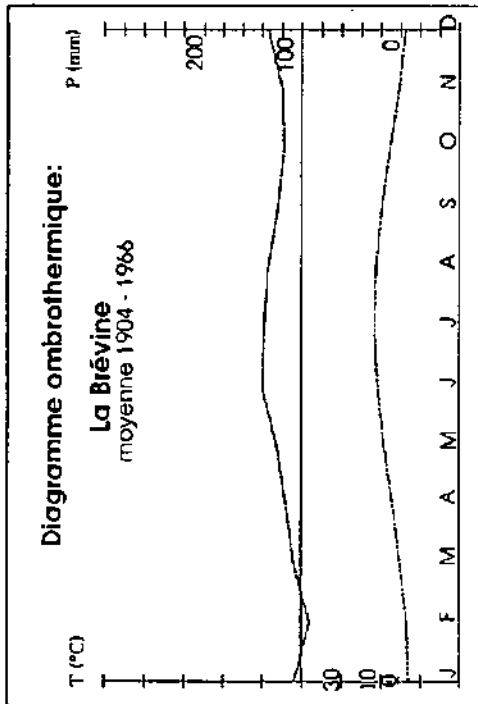
6.1.3.1. Les précipitations atmosphériques

Conformément à la prévision effectuée sur la base des moyennes calculées entre 1901 et 1960, le gradient de pluviosité "ouest-est" le long de l'Arc jurassien est maintenu en 1991 entre La Brévine et Bellelay. Il est ainsi tombé 1412 mm d'eau à La Brévine (99% des 1424 mm moyens) et 1158 mm (88% des 1309 mm moyens) à Bellelay. Les valeurs pour les stations intermédiaires géographiquement comparables confirment ce gradient (La Chaux-de-Fonds et Saignelégier). Par analogie avec les hauts-marais de La Chaux-d'Abel et des Pontins, nous avons analysé les résultats de la station de Mont-Soleil, en moyenne plus pluvieuse que La Brévine avec 1458 mm (effet sommital), mais particulièrement sèche en 1991 avec 1212 mm, soit 83% de la moyenne. L'année 1991 est donc marquée par une accentuation du gradient pluvial le long du Jura. Si les moyennes indiquent un déficit annuel normal de 115 mm entre La Brévine et Bellelay, il a été 2,2 fois plus grand en 1991 avec un écart de 254 mm entre les deux sites.

Les résultats des travaux de SPINNER (1927) et MATTHEY W. (1971) ont montré que sur une longue période, les précipitations se répartissent régulièrement tout au long de l'année. Dès lors il est possible de prendre en considération les valeurs moyennes par semestre pour des comparaisons annuelles et des estimations quant à la déviation à la moyenne. Considérés par semestre, afin d'assurer une comparaison avec les données de l'hiver et du printemps 1992, les deux

Figures 79, 80 et 81: Diagrammes ombrothermiques

Figure 79: diagramme ombrothermique moyen (selon MATTHEY W., 1971)



Précipitations annuelles moyennes 1424 mm
Température annuelle moyenne 4,7°C

Précipitations 1991 1412 mm
Température moyenne 1991 4,8°C

Figure 80: Diagramme ombrothermique 1991 (selon ISM)

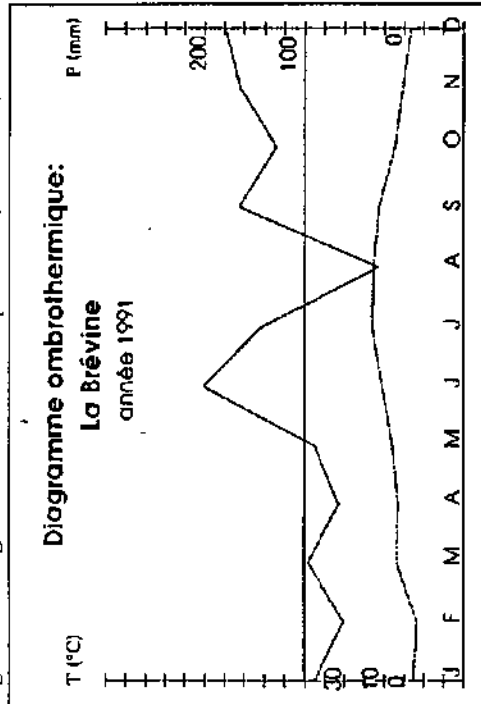
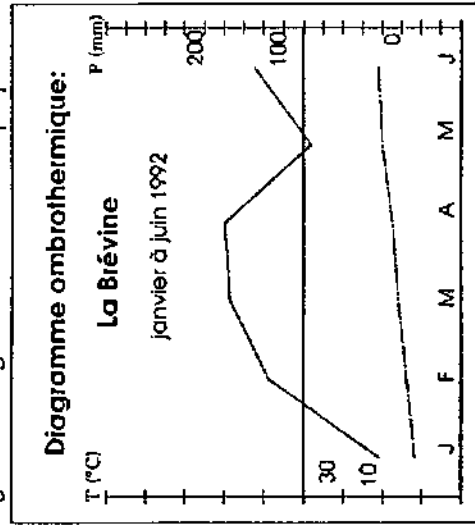


Figure 81: Diagramme ombrothermique premier semestre 1992 (selon ISM)



sites ont reçu environ 44% du total annuel lors du premier semestre 1991. Rapporté à la moyenne annuelle, l'apport pluvial a été d'environ 41% lors de ce premier semestre, sans différence significative entre les deux stations. L'été et l'automne ont donc été nettement plus pluvieux à La Brévine qu'à Bellelay. En 1992 par contre, les premiers semestres se différencient avec de fortes précipitations à La Brévine (53.2% de la moyenne annuelle) alors que Bellelay recevait lors de la même période 48% de la moyenne, ce qui indique un deuxième printemps relativement sec.

Considérés mensuellement, les résultats montrent des mois de juin et de décembre nettement excédentaires pour toutes les stations en 1991. Août est partout extrêmement sec avec 5 à 20% des précipitations moyennes. La Brévine (et par analogie La Chaux-de-Fonds), se distingue par les mois de septembre-octobre-novembre et décembre excédentaires, alors que pour Mont-Soleil (et par analogie Saignelégier), septembre est déficitaire et que pour Bellelay, septembre et octobre sont déficitaires, la fin de l'année restant excédentaire pour les deux stations.

Les météorologues considèrent qu'il faut au moins 1 mm de précipitation pour que la pluie ait une signification (rapport humidité/évaporation favorable à l'humidité, ou accessibilité de la pluie pour les plantes assurés). En moyenne pour l'Arc jurassien, il y a environ 150 jours/an qui répondent à cette condition. Corollairement aux valeurs de précipitations, 1991 a vu un nombre de jours à précipitations significatives plus faible que la moyenne 1901-1960. Pour la croissance végétale, et le fonctionnement physiologique des sphaignes en particulier, il est intéressant de noter les relations entre précipitations et capacité de saturation de la tourbe selon son degré d'humification. RINGER *et al.* (1976) indiquent que la tourbe blonde, jeune, peu humifiée conserve une aération de 7-10% du volume pour des précipitations inférieures à 20 mm alors que des précipitations inférieures à 1 mm suffisent à saturer totalement des tourbes fortement humifiées. Dès lors, il est intéressant de noter qu'à La Brévine comme à Bellelay, il y a eu 70 jours avec > 1mm de précipitations durant la période de végétation (1 avril 10 octobre) sur 193. Pour les fortes précipitations, nous comptons 11 journées à La Brévine et 9 à Bellelay. Pour les deux sites, il y a une bonne répartition tout au long de la période considérée, avec un net déficit en août et un excédent de pluies moyennes en juin. La figure 83 illustre les précipitations quotidiennes de La Brévine du 1.4 au 1.10.1991.

La périodicité des précipitations joue également un rôle important. BURGER (1959) met en évidence une dominance de périodes de courte durée de sécheresse entre avril et septembre alors que les périodes de longue sécheresse sont plus fréquentes pendant la mauvaise saison. MATTHEY W. (1971) indique une durée maximale de 11 jours sans précipitations en 1964, année sèche et de 9 jours en avril 1968, année très pluvieuse. Pour notre part, il n'y a pas de différence nette entre La Brévine et Bellelay. 1991 doit être considérée comme une année sèche, avec de longues périodes sèches assez fréquentes. Nous comptons 15 jours sans pluie à fin mai à La Brévine (2 à 3 jours au début avec 0.2 mm) puis une période de 13 jours suivie d'une autre de 9 jours en août, les deux périodes n'étant coupée que par un orage le 22 août. La figure 83 illustre cette périodicité.

Il est intéressant de noter que le volume de précipitations du Jura est parfaitement similaire à celui enregistré par FRANCEZ (1990) dans le Massif Central (Mont du Forez). Le Massif Central est caractérisé par un maximum pluvial d'été. Pour l'Allemagne (Schleswig-Holstein), LUETT (1992) indique des précipitations nettement plus faibles (764 mm en moyenne), avec une forte proportion en juillet et août. Nos données indiquent que les périodicités saisonnières ne sont pas significatives pour la croissance des hauts-marais, mais que le volume totale des précipitations joue un rôle. Plus

Figure 82: climatogramme comparatif entre le climat moyen et les données 1991 et 1992

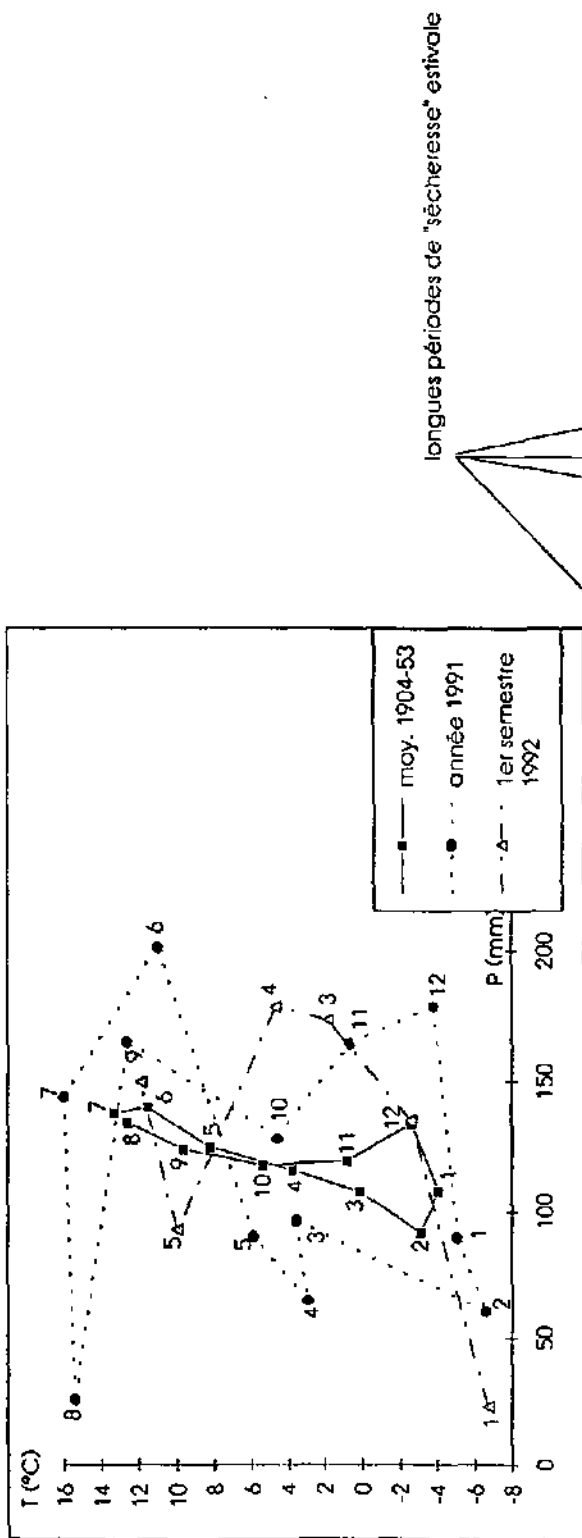
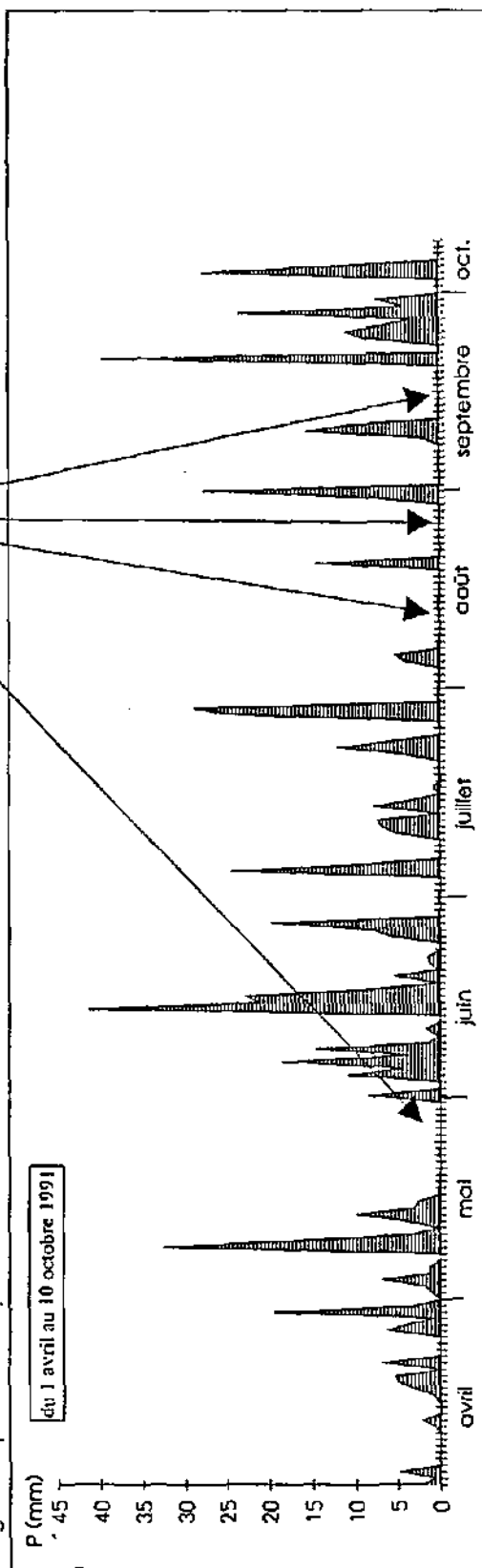


Figure 83: pluviométrie quotidienne à La Brevine en 1991



les hauts-marais se développent à des latitudes basses, plus les précipitations doivent être fortes pour garantir la compétitivité de ces milieux. L'importance des précipitations hivernales et l'accumulation des stocks de neige permet de compenser le déficit pluvial estival par une mise en charge vernale suffisante par rapport au Massif Central.

6.1.3.2. La température

SPINNER (1927) et MATTHEY W. (1971) indiquent clairement que l'expression des moyennes de température masque totalement la grande variabilité du climat thermique. Le tableau 27 présente outre les moyennes mensuelles, les valeurs moyennes des mesures effectuées à 7h, à 13h et à 19h ainsi que les maxima et minima. Nous constatons que **chaque mois a présenté des températures négatives**, et que seuls juin et juillet n'ont pas eu de jours de gelée blanche. MATTHEY W. (1971) indique déjà cette caractéristique alors que les données de FRANCEZ (1990) pour le Massif Central indiquent une diminution thermique moins importante en été. De manière générale, l'année 1991 est caractérisée par un temps froid malgré les faibles précipitations et l'ensoleillement nettement excédentaire.

6.1.3.3. L'humidité

L'humidité relative présente des contrastes remarquables, dont on sait qu'ils sont nettement accentués dans les tourbières et à leurs abords. Les données fournies par la stations de la Brévine montrent des valeurs élevées à 7h tout au long de l'année, ce qui est à mettre en relation avec les nombreux jours de rosée estivale et la **régularité annuelle des brouillards matinaux** (tab. 27). Cependant, les valeurs matinales de la station officielle sont encore nettement inférieures à celles mises en évidence par MATTHEY W. (1971) dans la tourbière du Cachot elle-même. Il signale un contraste très important entre le jour (remarquablement sec) et la nuit (totalement saturée), avec **des changements très rapides au lever et coucher du soleil** et ce, durant toute l'année. La même constatation a été faite pour les marais de la vallée des Ponts-de-Martel (MATTHEY Y. 1984, MULHAUSER 1989). Les brouillards nocturnes mis en évidence par MATTHEY W. (1971) sont donc assez locaux et liés aux tourbières.

Ils en sont **une caractéristique, une conséquence et une condition pour le maintien de la végétation spécifique**. Avec l'éloignement des marais, seule la rosée subsiste.

6.2. CARACTERISTIQUES MICROCLIMATOLOGIQUES

6.2.1. Introduction

Comme pour les autres chapitres, notre approche des caractéristiques microclimatologiques s'inscrit dans l'optique de la mise en évidence des conditions écologiques optimales expliquant le dynamisme secondaire des sphaignes lors des phases initiales de la régénération. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi quelques démarches liées directement à la spécificité propre de nos trois séries. Nous pouvons résumer les principales approches par:

- la mise en évidence et la quantification du rôle protecteur des **structures végétales en touradons** par rapport aux surfaces ouvertes de tourbe nue et aux buttes à sphaignes.
- la caractérisation de la **spécificité climatique des gazons muscinaux**.

- **l'influence des vaccinées sur les conditions microclimatiques en bordure des fosses par rapport à la forêt asséchée et au marais tremblant inondé.**

La présentation des résultats ainsi que la discussion reposent sur les connaissances déjà bien fouillées des conditions microclimatiques liées à l'interface sol-air au niveau des buttes et des gouilles à sphaignes.

Nous empruntons ici à LELOUP & JACQUEMART (1963) la définition du microclimat:

"(Le microclimat est un) ensemble complexe de variables physico-chimiques; le milieu conditionne l'existence de groupes de plantes et d'animaux. Ceux-ci dépendent du climat local, c'est-à-dire de la situation géographique du site. Car les conditions météorologiques locales agissent sur la flore et la faune et cette dernière en subit les influences soit directement, soit par l'intermédiaire de la végétation non seulement par les relations trophiques mais également par les microclimats induits par la couverture végétale.

Le microclimat résulte des conditions climatiques générales modifiées par le tapis végétal. Sa définition demande de fixer l'ordre de grandeur des variables et leur dimension spatiale. ... L'étude microclimatique porte généralement sur les couches d'air proche du sol et jusqu'à 1 mètre ainsi que sur les 50 premiers centimètres du sol."

Le fonctionnement microclimatique au niveau des sphaignes a été décrit depuis longtemps déjà suite aux travaux de FIRBAS (1931) et de TINBERGEN (1940), repris et complétés par LELOUP & JACQUEMART (1963). Nous pouvons faire émerger les grands principes suivants:

Lorsque la tourbière est couverte d'un épais tapis de sphaignes, la structure lacunaire du tapis en fait un mauvais conducteur thermique. Les feuilles de sphaignes déterminent une très importante surface de contact entre l'air et le sol. Comme ces plantes sont gorgées d'eau, **l'évaporation continue provoque un refroidissement superficiel**. Ce tapis sphagnal présente de très mauvaises caractéristiques de conductibilité thermique en raison de sa forte "porosité" (structure lacunaire), si bien que le jour ce sol ne permet pas l'accumulation de chaleur en profondeur, mais il chauffe l'air sus-jacent par conduction. La nuit, la perte de chaleur est par contre très importante.

De nombreux travaux font mention des valeurs de conductibilité thermique de la tourbe. WICKY (1988) donne les valeurs du coefficient λ d'après les résultats de BERENYI (1961):

Humus	0.003	J/m/s/K
Sol de marais humide	0.002	
eau libre, calme	0.0015	
Sol de marais sec	0.00015	
Air calme	0.00005	

Les résultats de JENSEN (1961) donnent les mêmes valeurs avec pour la tourbe sèche, un coefficient de 0.00027 selon KARSTEN (1911, *in* JENSEN, *op. cite*)

En conséquence, **les variations thermiques au niveau du sol sont très importantes**, avec un échauffement des sphaignes supérieur à celui de l'air en contact et un refroidissement très rapide vers la profondeur. TINBERGEN (1940) indique une température de 10°C supérieur dans les capitules

lum de sphaignes par rapport aux premiers centimètres d'air vers 12h alors que la nuit, la température des sphaignes est quelques degrés plus basse que l'air. Nos résultats confirment parfaitement ces résultats sans montrer une telle différence durant la journée. Les fluctuations thermiques journalières mise en évidence par MATTHEY W. (1971) avec une forte baisse nocturne à toute saison et des gelées de surface très fréquentes confirment si besoin est ces concepts fonctionnels.

FRANCEZ (1990) décrit également les causes des fluctuations thermiques des tourbes. Il cite WILLIAMS (1968, in FRANCEZ 1990) qui indique que la chaleur reçue à partir du rayonnement est employée à évaporer l'eau plutôt qu'à réchauffer le sol, sauf lorsque la nappe est profonde et le sol plus sec. MANNERKOSKI (1985) considère lui que les fluctuations thermiques induites par les mouvements de nappes sont faibles par rapport aux mouvements phréatiques.

6.2.2. Méthodes spécifiques

Vu le petit nombre d'appareils de prélèvements automatiques de données à notre disposition, nous avons ciblé strictement les buts scientifiques par un choix de stations de recherches limités et des durées d'échantillonnage aussi courtes que possible. La méthodologie générale décrite au chapitre 1.5 a été respectée tout au long des campagnes de recherches. Bénéficiant de trois systèmes d'enregistrements de données complets (température, humidité relative et évaporation), nous avons réduit la collecte d'informations à un ou deux cycles nycthémeraux. Dès lors, les comparaisons sont possibles formellement uniquement entre trois situations ayant fonctionné en parallèle le même jour. Vu les changements géographiques d'une tourbière à l'autre et les variations climatiques journalières, la stricte comparaison d'un jour à l'autre et d'un haut-marais à l'autre est hasardeuse. Nous ne retiendrons que les ordres de grandeur. En travaillant sur trois tourbières assez distantes, il aurait été idéal de bénéficier de matériels complémentaires afin de placer dans chaque marais un système fixe permettant les comparaisons directes et assurant le rattachement de nos trois systèmes mobiles aux variations climatiques journalières et locales. Le doublement du parc de matériel était malheureusement impossible. Vu les faibles durées de mesures possibles, les résultats ne permettent pas de travailler sur des moyennes journalières ou saisonnières. Ils sont à considérer comme des instantanés sélectionnés sur une base mésoclimatique la plus uniforme possible et ce, pour les trois saisons: temps beau sans nuage, vent nul pour l'ensemble du cycle nycthémera. Ces conditions ayant été respectées, sauf parfois pour les températures moyennes, les résultats offrent une base de comparaison, d'autant plus que, comme le montrent les résultats de MATTHEY W. (1971), l'évolution mésoclimatique entre le jour et la nuit est très semblable tout au long de la période de végétation pour les jours de beau temps stables.

Pour l'évaporation, les valeurs sont calculées en ml/h et expriment la quantité d'eau directement perdue par l'évaporimètre de PICHE pendant les heures de jour. En effet, la nuit (ou les jours de brouillard avec brume et les jours de pluie), l'évaporation est considérée comme nulle. Nous avons donc différencié les périodes diurnes et les nuits pour les calculs.

6.2.3. Description des sites étudiés

Pour la série des touradons, nous avons séparé les situations initiales sans sphaignes et celles plus évoluées avec des coussinets de sphaignes. L'accent a été porté sur les surfaces ouvertes formées par les espaces plus ou moins serrés entre les touradons, là où la litière de feuilles tombantes ne couvre pas le sol. La tourbe (ou les sphaignes) est donc totalement exposée. Le touradon lui-même a été pris en compte au niveau de sa surface, afin d'estimer le rôle des tiges et des feuilles

Tableau 28: Résultats microclimatiques des trois séries

Résultats microclimatiques de trois situations principales caractérisant les séries évolutives
 tourbe nue, butte à sphaignes et marais tremblant (les moyennes sont calculées sur 24 h avec 288 mesures)

Saison	Situation	Dates	Température (°C)												Humidité relative (%)						Evapo. (ml/h)	
			-5 cm			-1 cm			+2 cm			+20 cm			+2 cm		+20 cm		+20 cm			
			moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.
Print.	tourbe nue Le Cachot La Chaux-d'Abel	12-13/05/92 14-15/05/92	9.9	12.3	7.9	13.7	31.9	0.5	11.1	28.2	-3.8	11.6	30.0	-3.6	64.9	96.0	19.4	55.1	83.9	19.9	0.67	0.83
			13.5	17.9	9.1	16.5	32.1	3.3	15.5	32.3	-0.2	14.8	30.1	-1.5	68.6	92.9	37.5	61.8	91.5	22.5	0.62	0.65
			9.4	13.5	6.5	13.3	32.3	0.9	12.1	31.7	-3.6	11.3	28.9	-3.5	63.6	92.1	30.3	60.0	90.5	20.7	0.93	1.22
			11.3	12.1	11.0	15.1	28.7	7.4	14.9	26.4	7.6	14.8	24.0	7.6	86.9	96.6	61.1	76.1	94.7	44.4	0.13	0.31
Été	tourbe nue Le Cachot La Chaux-d'Abel	22-23/07/91 9-10/07/91	18.2	20.3	16.3	19.1	31.1	9.4	17.1	32.4	1.2	17.2	32.7	2.5	69.6	97.3	33.7	69.8	99.3	29.5	0.54	0.77
			15.7	19.7	12.5	23.9	35.9	7.1	18.5	33.2	3.4	18.1	29.2	5.2	72.2	99.5	35.3	72.0	99.4	36.4	0.49	0.80
			17.4	21.0	14.2	17.9	35.4	4.9	16.5	30.9	1.5	17.0	31.8	1.7	75.4	99.8	37.4	72.9	110.0	30.9	0.45	0.65
			15.9	19.3	13.4	16.4	27.6	10.1	14.7	30.2	4.7	15.0	30.8	4.6	80.9	98.6	31.4	80.0	98.3	35.0	0.22	0.30
Aut.	tourbe nue Le Cachot La Chaux-d'Abel	31/10-1/11/91 9-9/10/91	3.7	5.5	2.6	1.6	11.0	-1.3	1.7	19.2	-7.6	2.4	18.6	-7.5	81.5	98.4	36.0	78.4	96.8	31.9	néant	néant
			10.0	14.5	5.6	10.3	22.8	2.7	7.2	22.2	-4.6	7.5	23.6	-4.3	75.8	93.0	37.4	76.4	94.8	32.7	0.23	0.25
			5.3	6.3	4.7	0.9	10.1	-2.9	1.4	18.1	-7.3	1.8	19.1	-7.2	82.1	96.9	31.2	82.9	98.5	31.0	néant	néant
			9.0	10.7	7.8	7.2	20.7	2.7	5.8	22.2	0.3	5.4	20.5	-0.4	97.5	110.0	80.5	95.7	98.9	73.7	néant	néant

dressées et de caractériser le "sol" de la souche elle-même. Enfin, puisque l'observation montre que l'apparition initiale des sphaignes est liée à cette structure (c.f. fig. 36 et 37), nous avons mesuré les particularités climatiques des cavités formées entre la partie basale des souches de touradons et le couvert de tiges et feuilles mortes tombant régulièrement autour du touradon. L'existence de cette cavité est liée au fonctionnement hivernal car la neige provoque un aplatissement des pousses dressées vers l'extérieur.

Pour la série des gazons de mousses, l'environnement général est plus ouvert, avec une gradation depuis les vastes plages de tourbe nue, croûtées, aux gazons monospécifiques de *Polytrichum strictum*. Chacun des faciès a été analysé en détail dans le but de mettre à jour l'importance et le rôle du gazon muscinal. La troisième situation choisie illustre le stade ultime des premières phases évolutives possibles avec l'analyse d'une jeune butte à sphaignes s'individualisant d'un replat de sphaignes dominant des Polytrics. Par analogie, cette situation illustre également le stade final décrit pour la série des touradons.

Pour la série des marais tremblants, nous avons choisi de mesurer les relations microclimatiques entre le centre ouvert de la fosse, très humide et couvert de sphaignes très lâches, le manteau de *Vaccinium uliginosum* et *Eriophorum vaginatum*, également en présence d'un tapis de sphaigne et la forêt secondaire asséchée, sans sphaigne en sous-bois. Le but ici est de quantifier le rôle et l'apport latéral des sphaignes quant à la régulation microclimatologique et au potentiel de développement du tapis sphagnal de la fosse mouillée vers la forêt.

6.2.4. Caractéristiques microclimatologiques générales

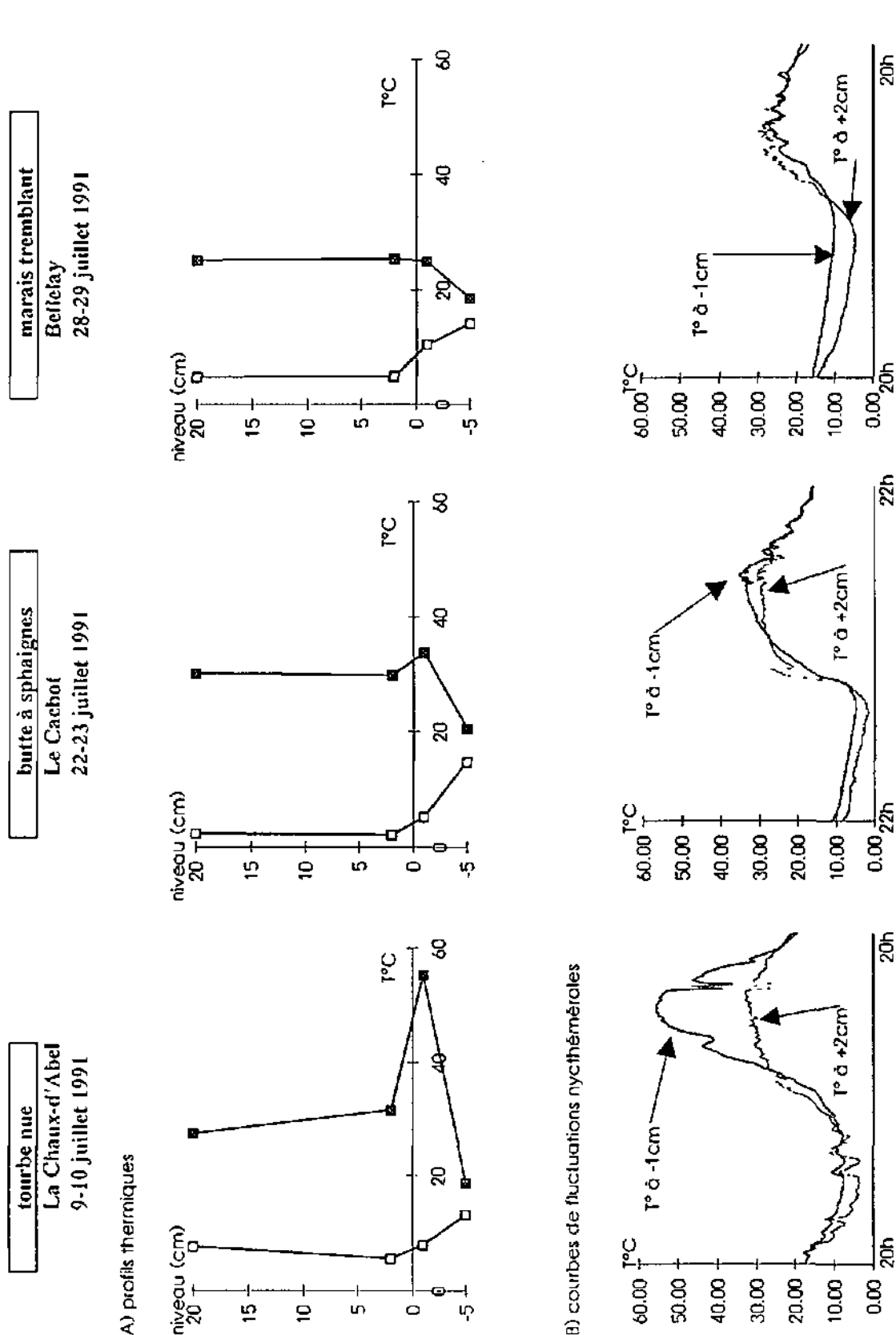
Conformément aux travaux de JENSEN (1961), LELOUP & JACQUEMART (1963), MATTHEY W. (1971), SCHMEIDL (1978), FRANCEZ (1990) et LUETT (1992), les résultats que nous avons obtenus pour les stades principaux de nos trois séries confirment les fortes amplitudes jour-nuit, aussi bien pour la température que pour l'humidité ainsi que les nettes différences entre les séries terrestres et la série des marais tremblants. Nous rassemblons donc ici (sous caractéristiques générales) les résultats nous permettant de poser les caractères propres à l'évolution saisonnière des situations les plus typiques du système en régénération décrit et ce, pour l'année 1991. Nous analyserons donc les résultats des surfaces de tourbe nue (état initial du terrain) par confrontation à ceux des jeunes buttes à sphaignes (état final de la dynamique de la régénération) pour les séries terrestres, et à ceux des marais tremblants pour la série "aquatique". Les résultats chiffrés pour les trois situations décrites sont rassemblés au tableau 28. Sur la figure 84, nous avons groupé les profils thermiques d'été des trois situations en figurant les courbes des moyennes horaires maximales et minimales du cycle nyctéméral complet. L'écart à chaque niveau de mesure donne l'amplitude thermique maximale pour le niveau considéré. Sur la même figure, nous présentons les courbes estivales de variations thermiques à +2 cm et -1cm pour illustrer les inversions diurnes et nocturnes entre la surface du sol et l'air.

6.2.4.1. Les surfaces de tourbe nue (stades 1 des séries terrestres)

Elles ont été analysées à La Chaux-d'Abel et au Cachot. Il est très intéressant de constater de très fortes différences entre les deux séries de résultats. Si ces différences s'expliquent en partie par les variations climatiques générales liées aux jours de mesures, cette considération est surtout valable pour les mesures automnales (c.f. ci-après), les journées d'été et de printemps étant très proches. Au Cachot, les plages de tourbe nue sont asséchées par le drainage et forment des croûtes qui se craquèlent. Des algues colonisent la surface et forment un film superficiel identique à celui observé

Figure 84: Profils thermiques et fluctuations nyctémérales, période estivale

Figure 84: profils thermiques et fluctuations nyctémérales comparatifs de trois stades typiques des séries évolutives. Période estivale. Les courbes des profils thermiques illustrent les moyennes horaires: l'heure à la moyenne maximale pour les courbes pleines et celle à la moyenne minimale pour les courbes vides



par WICKY (1988). A La Chaux-d'Abel par contre, le sol est nettement plus compact et ne présente pas de croûtes. De plus, la structure générale de la végétation en touradons limite la superficie des plages de tourbe et crée un abri face aux vents de sol.

A) Les températures estivales

Les résultats du tableau 28 montrent clairement que l'échauffement estival est très fortement limité au Cachot puisque le maxima thermique mesuré est inférieur à celui de la jeune butte à sphaignes pour la profondeur de -1 cm (31.1°C et 35.4°C). A La Chaux-d'Abel par contre, l'échauffement du sol dans son premier centimètre de surface est, en été, remarquablement haut avec un maxima de 55.9°C! A -5 cm de profondeur, la tourbe du Cachot s'échauffe par contre plus que celle de La Chaux-d'Abel. Cette différence significative s'explique par la fissuration de surface des croûtes du Cachot et la pénétration de l'air en profondeur.

B) Les températures automnales

Les amplitudes saisonnières sont également plus importantes au Cachot pour le niveau -5 cm, avec un net refroidissement automnal et un retard printanier. Pour le premier centimètre du sol, l'abaissement thermique automnal est particulièrement marqué au Cachot. Les mesures ont été effectuées entre le 31.10 et le 1.11, deux journées froides. La station de La Brévine donne -5.6°C le matin du 1.11 pour une moyenne journalière de -0.1°C. Lors des mesures à La Chaux-d'Abel, la température générale était douce, y compris à La Brévine où la station donne des moyennes de 7.4°C et de 6.2°C pour les journées des 8 et 9 octobre. Ces considérations montrent à quel point il est difficile de comparer deux milieux identiques, non analysés le même jour. Nous considérerons donc les résultats automnaux du Cachot comme illustratifs d'une journée froide et ceux de La Chaux-d'Abel comme ceux d'une journée chaude.

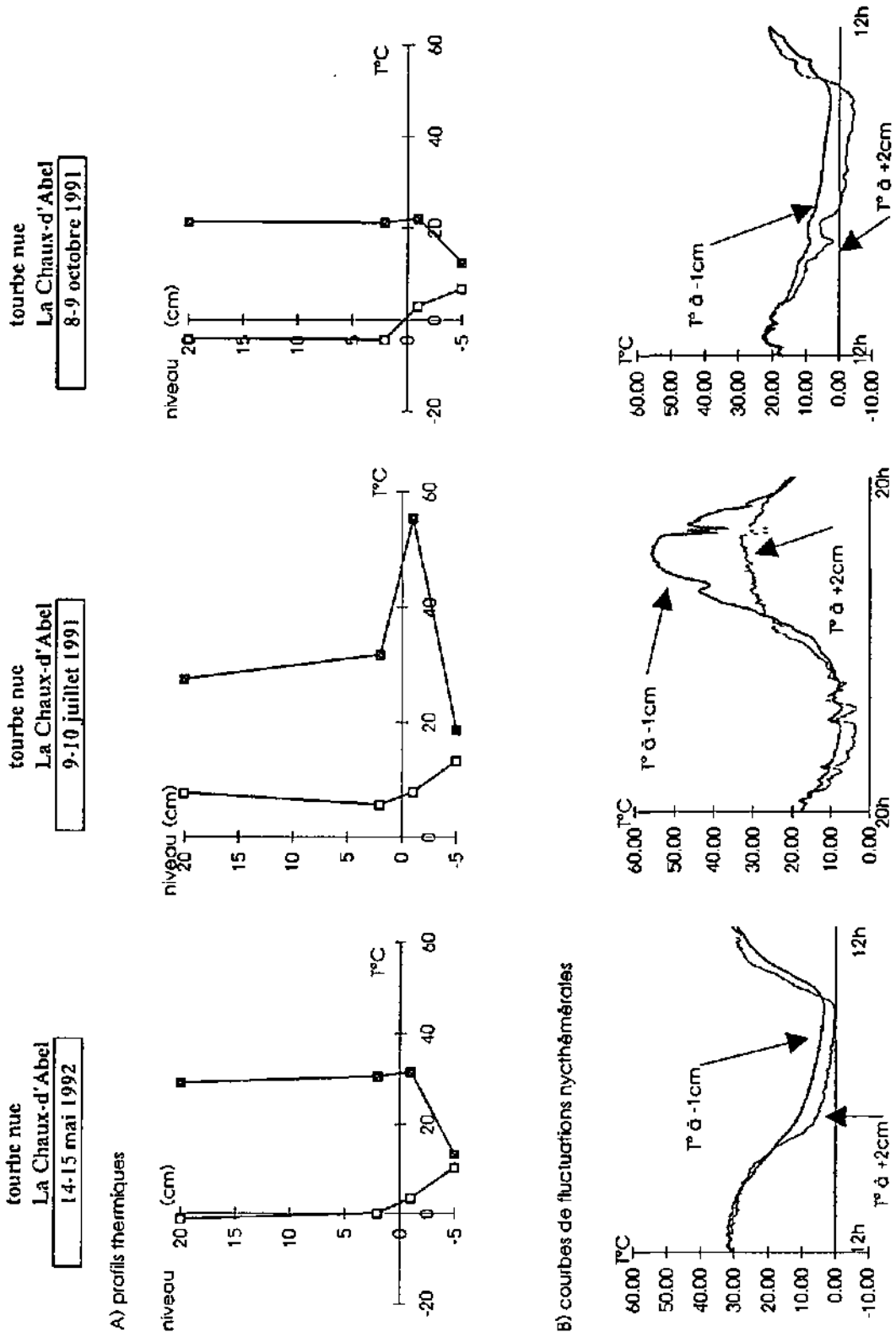
C) Les variations thermique à l'interface "sol-air"

L'interface "sol-air" présente pour la tourbe nue des différences thermiques significatives de +20 cm à -5 cm. Les profils thermiques de la figure 85 expriment ces relations pour les trois saisons à La Chaux-d'Abel. A +20 cm, les amplitudes sont les plus grandes au printemps et les plus faibles en été. A +2 cm, le réchauffement et le refroidissement par le sol provoquent une amplitude de température plus importante en été alors qu'en automne et au printemps, les valeurs sont similaires à celles de +20 cm. C'est la surface du sol qui subit les plus fortes modifications saisonnières et les plus grandes amplitudes. Par contre, dès -5 cm, la stabilité thermique est remarquable, même pour des tourbes nues asséchées. La figure 85 présente les courbes nyctémérales pour les niveaux +2 cm et -1 cm. Elles illustrent parfaitement les inversions thermiques entre le jour et la nuit et les modifications saisonnières. Par comparaison, les résultats extrêmes de SCHMEIDL (1978) sont intéressants. Cet auteur a mesuré le 14 juillet à 15h20 une température de 40°C à +5 cm, un record de 71.1°C en surface du sol et 31°C à -5 cm pour une tourbe nue. WICKY (1988) met en évidence des températures beaucoup plus basses avec un maxima de 32.5°C en juin pour une température de l'air de 23°C. Nous considérons notre résultat (55.9°C !) comme très élevé mais non exceptionnel. Ayant choisi un beau jour de juillet parmi d'autres pour effectuer les mesures, nous ne pouvons imaginer être tombé sur le seul jour présentant de telles valeurs.

Dans les deux tourbières, le printemps montre les valeurs d'humidité relative les plus faibles, avec des minima inférieurs à 20%. L'automne est légèrement plus humide que l'été. Les valeurs sont un peu inférieures en toute saison au Cachot (tab. 28).

Figure 85: Profils thermiques et fluctuations nycthémérales, tourbe nue

Figure 85: profils thermiques et fluctuations nycthémérales comparatifs de la tourbe nue pour les trois saisons testées. Les courbes des profils thermiques illustrent les moyennes horaires; l'heure à la moyenne maximale et celle à la moyenne minimale pour les courbes vides



D) Les valeurs d'évaporation

L'évaporation est importante, tout autant au-dessus de la tourbe nue qu'au-dessus de la jeune butte à sphaignes. Les résultats sont présentés au tableau 28. La journée de printemps a provoqué la plus forte évaporation avec des valeurs de 0,93 ml/h au niveau du sol et de 1.22 ml/h à +20 cm au Cachot pour un jour sans vent. Les valeurs entre saison et sites sont difficilement comparables vu la forte influence des vents locaux au niveau du sol. Toutes nos valeurs sont nettement inférieures à celles données par MATTHEY W. (1971) pour Le Cachot avec 1 ml/h par temps couvert et 2 ml/h par temps ensoleillé.

6.2.4.2. La jeune butte à sphaignes (stade 4 de la série des gazons de mousses)

A) Les températures estivales

Pour la jeune butte à sphaignes, les images générales des courbes d'amplitude thermique sur le profil de mesures ne sont pas très différentes, sauf en été, pour le niveau -1 cm pour lequel la présence de sphaignes est hautement significative (fig. 84). La figure montre l'échauffement moindre du sol et de l'air sus-jacent par rapport à la tourbe nue. Nous constatons que les sphaignes sont plus chaudes que l'air, conformément aux hypothèses, mais que l'écart avec l'air est nettement plus faible que celui indiqué par TINBERGEN (1940) (4.5°C pour les 10°C cité par cet auteur. Comme le montre le tableau 28, la température estivale moyenne (sur le cycle de 24h) des capitulum est de 18°C avec une amplitude de 30.9°C. Ce résultat s'approche parfaitement de ceux fournis par LUETT (1992) pour les *Erico-Sphagnetum magellanicum* (c.f. tab. 29).

B) Les températures automnales et vernales

Pour les autres saisons, les capitulum sont un peu plus froids que la tourbe nue en automne (Cachot et Chaux-d'Abel) et présentent des périodes de gel. Au printemps, tourbe nue et butte à sphaignes offrent les mêmes différences entre la surface et la profondeur. De même, l'air passe encore par des températures négatives alors que ni la tourbe nue ni les sphaignes ne gèlent.

C) Les variations d'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air ne présente pas de différence significative par rapport à la tourbe nue sur le site du Cachot, ce qui laisse supposer que les fluctuations de l'humidité ambiante sont relativement similaires d'un milieu à l'autre sur la tourbière, pour autant que ceux-ci présente les mêmes degrés de fermeture face aux déplacements d'air (tab. 28).

D) Les variations d'évaporation

L'évaporation est par contre **nettement moindre au-dessus de la tourbe nue** qu'au-dessus du tapis de sphaignes. Nous avons mesuré 0.67 ml/h à +2 cm (contre 0.92) et 0.83 ml/h à +20 cm (contre 1.22).

6.2.4.3. Le tapis de sphaignes du marais tremblant (stade 1 et 2)

A) Les variations thermiques

Conformément aux hypothèses et aux résultats de LELOUP & JACQUEMART (1963) et SCHMEIDL (1978), les tapis de sphaignes gorgés d'eau s'échauffent moins que les sphaignes "sèches" des buttes et que la tourbe nue. Le tableau 28 donne une moyenne journalière de 16.4°C avec un maxima de 27.6 °C en été pour les capitulum gorgés d'eau. La température moyenne est de 7.4°C plus faible que pour la tourbe nue de La Chaux-d'Abel avec un maxima de 28.3 °C inférieur (55.9°C

Tableau 29: Valeurs thermiques comparatives pour différents milieux

Référence	Période	Milieux	moyenne	max	min	amplitude max
JENSEN	juin 1957	gouille à <i>S. cuspidatum</i>	13.6	34.1	3.8	24.1
		<i>S. magell. ass.</i>	19.2	34.4	1.5	31.2
		complexe d'érosion	20.0	43.5	2.2	36.2
SCHMEIDL	8 juillet 1975	butte à Sphaignes <i>S. recurv. tapis</i>		37.0	7.0	30.0
	14 juillet 1975	tourbe nue		30.5	10.0	20.5
				71.1		
FRANCEZ	24 juillet 1980	tapis de <i>S. papillosum</i>		32.0	2.0	30.0
WICKY	juillet 1987 (moyennes)	t. sombre asséchée		24.9	12.6	
	14 juillet 1987	idem		31.5		
LUETT	juillet 1989	tapis de <i>S. magellanicum</i>	23.3	42.0	-1.0	39.3
		idem	18.6	41.6	-1.2	36.4
Cette étude	10 juillet 1991	tourbe nue	23.9	55.9	7.1	47.8
	23 juillet 1991	butte à Sphaignes	17.9	35.4	4.9	28.2
	29 juillet 1991	gouille à Sphaignes	16.4	27.6	10.1	15.6
	23 juillet 1991	gazon de Polytrics	19.9	39.8	6.2	32.6

contre 27.6°C). A l'inverse, l'eau maintient la température nocturne des capitulum plus haute. Outre ces pondérations entre le jour et la nuit, l'inertie thermique de l'eau est également importante quant à l'évolution saisonnière avec une moyenne automnale de 7.2°C.

B) Les variations d'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air est un peu plus haute pour nos trois périodes de mesures pour cette série, attestant le caractère "aquatique" dominant du sol. Néanmoins, les minima estivaux descendent à 31.4% au niveau du sol et 35% à +20 cm ce qui donne **des valeurs d'assèchement parfaitement identiques à celles des autres situations**. Au printemps, lorsque la nappe est très haute, les différences avec les séries terrestres sont assez bien marquées. Nos valeurs automnales sont trop importantes car elles suivent deux journées de pluie qui ont fortement humidifié l'atmosphère.

C) Les variations d'évaporation

L'évaporation est quasi insignifiante au niveau du sol, avec 0.16 ml/h au printemps et 0.22 ml/h en été. Deux cycles nyctéméraux ont été suivis consécutivement en été. Les valeurs sont parfaitement identiques d'un jour à l'autre. A +20 cm, l'évaporation est un peu plus élevée avec 0.39 ml/h au printemps et 0.3 ml/h en été. Pour l'automne, les valeurs sont nulles, à mettre en relation avec la forte humidité ambiante de la journée.

6.2.4.4. Comparaison avec la littérature

Nous rassemblons dans le tableau 29 ci-contre quelques résultats provenant des études antérieures afin de permettre au lecteur une comparaison directe de nos valeurs avec celles mise en évidence dans des milieux relativement comparables. Nous constatons que la variabilité est importante d'un marais à l'autre ainsi qu'à travers les années, ce qui traduit bien l'aspect stationnel et ponctuel des mesures effectuées à une si petite échelle.

6.2.5. Caractéristiques microclimatologiques des touradons et influences des coussinets de sphaignes régénérés

L'observation de terrain montre que la série des touradons présente une régénération liée aux "cavités" formées entre les souches et la litière de tiges et de feuilles. Suite à la caractérisation générale des microclimats des faciès principaux de nos trois séries, nous allons présenter et discuter le rôle des touradons (structure propre et cavité), et celui des sphaignes recolonisant ces micro-milieus, par comparaison avec les surfaces de tourbe nue initiale. Les résultats chiffrés des trois périodes saisonnières sont rassemblés au tableau 30 alors que la figure 86 présente les profils thermiques estivaux pour les moyennes horaires maximales et minimales.

Tableau 30: Variations microclimatiques, Série des touradons

Résultats concernant les influences microclimatiques des touradons
 comparaison entre surface ouverte, sommet du touradon et cavité, en absence et en présence de sphaignes
 (les moyennes sont calculées sur 24 h avec 288 mesures)

Saison	Situation	Dates	Température (°C)						Humidité relative (%)						Evapo. (m/h)					
			-5 cm		-1 cm		+2 cm		+20 cm		+2 cm		+20 cm		+2 cm	+20 cm				
			moy.	min.	moy.	max.	min.	max.	moy.	max.	min.	max.	moy.	max.	moy./h	moy./h				
Print.	absence de S. tourbe nue sommet du touradon cavité	1-4-15/05/92	13.5	17.9	9.1	3.3	15.5	32.1	-0.2	14.8	30.1	-1.5	68.6	92.9	37.5	61.8	91.5	22.5	0.65	0.65
			11.7	16.2	6.5	0.2	14.1	20.7	-2.1	14.6	33.9	-2.1	66.4	98.4	28.2	60.7	88.8	24.4	0.45	0.59
			non déterminé																	
Été	présence de S. replat à sphaignes sommet du touradon cavité	1-4-15/05/92	non déterminé																	
			non déterminé																	
			7.7	9.2	6.1	3.4	13.7	34.3	-1.9	14.9	32.4	-2.1	68.4	92.2	31.6	65.3	99.0	23.6	0.22	0.61
Été	absence de S. tourbe nue sommet du touradon cavité	9-10/07/91	15.7	19.7	12.5	7.1	18.5	33.2	1.4	18.1	29.2	5.2	72.2	99.5	35.3	72.0	99.4	36.4	0.49	0.65
			18.1	28.2	10.0	7.0	21.2	34.9	5.6	18.3	25.7	6.1	68.8	99.1	30.3	72.8	99.8	33.6	0.40	0.66
			13.1	13.7	12.7	11.3	20.4	38.1	5.8	18.6	33.9	5.0	83.8	110.0	46.7	71.0	99.8	32.0	0.18	0.65
Aut.	présence de S. replat à sphaignes sommet du touradon cavité	11-12/07/91	14.6	17.4	11.6	7.0	18.1	33.3	3.5	20.1	37.7	4.0	73.2	98.4	31.2	68.8	99.3	25.7	0.40	0.64
			18.9	27.0	9.6	6.5	19.2	36.7	1.7	19.3	31.1	5.2	71.0	99.5	30.2	71.5	110.0	32.0	0.41	0.63
			13.9	15.2	12.3	5.8	19.9	40.2	3.1	19.1	37.7	2.7	84.5	110.0	35.7	67.5	99.2	23.0	0.16	0.51
Aut.	absence de S. tourbe nue sommet du touradon cavité	8-9/19/91	10.0	14.5	5.6	2.7	7.2	22.2	-4.6	7.5	23.6	-4.3	75.8	93.0	37.4	76.4	94.8	32.7	0.23	0.25
			9.6	12.1	6.3	-1.9	7.3	24.6	-4.2	7.4	23.7	-4.2	86.7	98.8	43.4	79.4	97.7	33.8	0.10	0.24
			8.9	10.8	6.6	6.2	6.7	16.8	-1.7	7.2	24.5	-5.2	92.2	97.7	75.6	80.6	98.7	34.9	0.05	0.25
Aut.	présence de S. replat à sphaignes sommet du touradon cavité	9-10/10/91	9.9	19.1	5.9	4.7	10.5	29.1	-0.5	12.6	30.4	-0.3	75.3	94.3	37.9	66.0	95.6	27.1	0.25	0.62
			11.1	19.9	6.1	4.6	12.4	29.0	-0.7	13.0	29.1	0.7	72.3	97.6	31.7	67.5	98.7	27.9	0.38	0.82
			8.2	10.0	7.2	4.4	9.3	24.6	-1.3	12.4	28.9	-0.3	86.5	98.8	49.2	67.5	97.1	28.5	0.06	0.54

6.2.5.1. En absence de sphaigne

A) Les variations thermiques estivales

Les spécificités microclimatiques de la tourbe nue ont été présentées au paragraphe précédent. En été, la surface de la tourbe atteint des températures extrêmes avec une valeur de 55,9°C. Lors de la même journée, la température mesurée dans le premier centimètre de la souche, au sommet de la butte atteignait un maxima de 37,6°C. Dans les cavités au sol dénudé, la tourbe reste remarquablement fraîche avec un maxima de 19,7°C.

Parallèlement à ces résultats, les minima nocturnes sont pondérés dans le même sens, avec le maintien d'un sol chaud dans la cavité (11,3°C), alors que la tourbe nue exposée se refroidit jusqu'à 7,1°C. L'air par contre, immédiatement au contact du sol, ne réagit pas comme le sol lui-même. La cavité joue le rôle d'une mini serre et permet un échauffement plus important que pour l'air ambiant. Il y a donc un fort contraste entre la fluctuation thermique de l'air et celle de la surface du sol. Les températures mesurées à +20 cm montrent également un échauffement préférentiel de l'air en relation avec la cavité. En réalité, la sonde +20 cm n'est pas placée directement à l'intérieur de la cavité mais immédiatement au-dessus du toit de litière, protégé par la masse du touradon.

Comme les touradons sont assez serrés, la structure verticale qu'ils donnent au terrain permet la création de milieux protégés. La couleur clair des litières et le calme de l'air permettent des amplitudes thermiques nyctémérales un peu plus importantes que pour les couches d'air dominants les surfaces ouvertes avec la tourbe nue. Le rôle des tiges et feuilles dressées au-dessus du touradon est bien marqué par cette mesure thermique à +20 cm. C'est à ce niveau, ventilé mais légèrement ombragé que l'amplitude est la plus faible, avec le plus petit maxima comme le plus grand minima. Du point de vue thermique, le touradon a donc une influence sur l'air, en pondérant nettement les fluctuations par la structure de son feuillage alors que la cavité, par l'ombrage permanent qu'elle garantit, permet une protection thermique du sol considérable. La figure 86 montre également la qualité isolante des différentes surfaces pédologiques. A -5 cm, la butte présente de fortes variations entre le jour et la nuit, alors que dans la cavité, il y a une stabilité parfaite dès cette profondeur. Ce résultat conforte l'hypothèse liée aux différences thermiques entre les tourbes nues du Cachot et de La Chaux-d'Abel, et le rôle de la porosité et de la densité sur la conductibilité thermique.

B) Les variations thermiques automnales et vernales

L'évolution saisonnière confirme ces résultats. Nous noterons ici l'écart thermique important entre le sol du touradon et la cavité en automne, avec un minima de -1,9°C dans le touradon alors que le minima dans la cavité est de 6,2°C. Si la température de l'air fluctue très peu en été au-dessus du touradon, l'automne et le printemps montrent une nette uniformisation des valeurs par rapport à la surface de tourbe nue. La cavité présente en automne le plus faible échauffement et limite relativement bien le gel nocturne. Au-dessus de la cavité, l'amplitude thermique est importante en automne, avec un minima plus bas que celui de l'air ambiant. Il y a un plus fort refroidissement dans les creux protégés entre les touradons.

C) Les variations d'humidité relative de l'air

Du point de vue de l'humidité relative, les valeurs mesurées dans la cavité sont, sans surprise, en parfaite relation avec la spécificité thermique de ce micro-habitat. La moyenne très haute (83,8%)

indique une très longue durée journalière avec saturation. L'échauffement de l'air provoque néanmoins un assèchement relatif avec une valeur minimale de 46.7%. Les valeurs minimales atteintes par les surfaces ouvertes sont 11% plus basse pour la tourbe nue, alors que c'est au niveau du touradon que l'air s'assèche le plus avec une valeur minimale de 30.3%. Les zones protégées entre les touradons, au-dessus des toits des cavités est légèrement plus sec que l'air ambiant à +20cm au-dessus du touradon et au-dessus de la tourbe nue. Cependant, il y a une bonne uniformité des valeurs moyennes autour de 72% pour 24 heures.

C'est en automne que la cavité reste le plus longtemps et le plus fortement saturé par la basse température qui y règne. La moyenne journalière y est de 92% avec un minimum de 76%! A l'extérieur comme à +20 cm, l'air est un peu plus humide qu'en été mais pas dans de telles proportions. Comme nous l'avons déjà indiqué dans la caractérisation générale, les valeurs pour le printemps sont les plus basses, avec une journée de mesures assez sèche.

D) Les variations d'évaporation

L'évaporation mesurée sur ces différents lieux d'échantillonnages montre également la forte protection de la cavité. Durant l'été, nous avons placé deux évaporimètres autour d'une butte afin d'estimer le rôle de l'orientation. **La face nord marque un léger fléchissement de l'évaporation horaire par rapport à la face sud.** Les modifications microclimatiques selon l'orientation et les pentes ont été mesurées en relation avec la productivité primaire des sphaignes par RYDIN (1984). Il montre que l'orientation est importante mais que c'est en combinaison avec la pente que l'effet thermique et hygrométrique est le plus marqué.

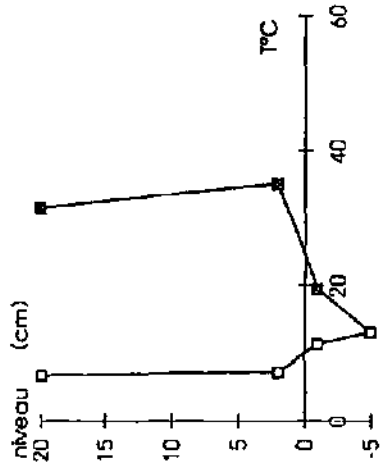
Ainsi, **au niveau du sol**, il y a une évaporation 2.7 fois moins importante dans la cavité qu'au-dessus de la tourbe nue exposée. Sur la butte, au milieu des tiges feuillées, l'évaporation n'est que légèrement inférieure à celle de la tourbe nue. **A +20 cm**, il y a une uniformisation des valeurs, y compris pour la zone protégée entre les touradons. A ce niveau, l'évaporation est équivalente à celle mesurée à 1.5 m à côté de la cabane météo (0.66 ml/h, soit, **3.6 fois plus que dans la cavité**).

Au printemps, la différence entre les niveaux +2 cm et +20 cm s'estompe nettement. Les valeurs sont maximales et identiques à celles de l'été pour l'air ambiant. En automne, l'air frais de la cavité provoque un arrêt presque total de l'évaporation dans la cavité (0.05 ml/h) alors qu'à l'extérieur, bien que faible également, l'évaporation reste 5 fois plus haute au niveau de la tourbe nue, où il n'y a pas de différence entre les deux niveaux aériens. Sur la butte par contre, la valeur au niveau du sol est plus faible et uniquement 2 fois plus haute que dans la cavité (0.1 ml/h).

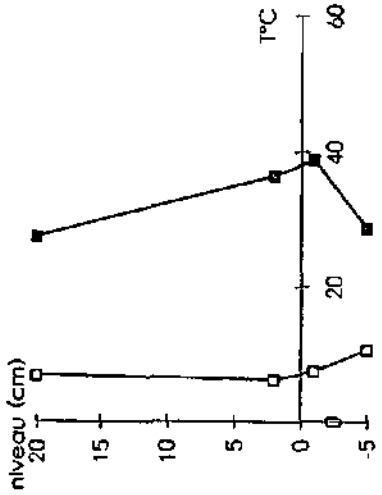
Figure 86: Déterminisme du rôle des touradons sur les pondérations thermiques

Figure 86: Déterminisme du rôle des touradons sur les pondérations thermiques au moyen de profils
 Les courbes des profils thermiques illustrent les moyennes horaires: l'heure à la moyenne maximale pour les courbes pleines et celle à la moyenne minimale pour les courbes vides

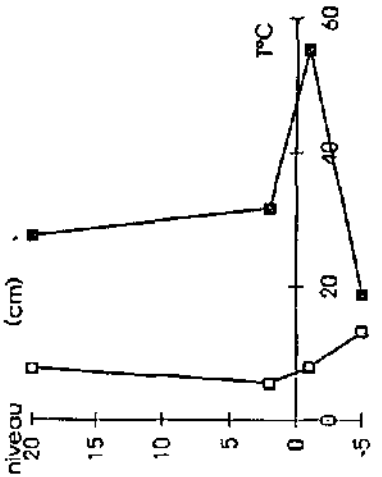
cavité au pied du tourradon
 La Chaux-d'Abel



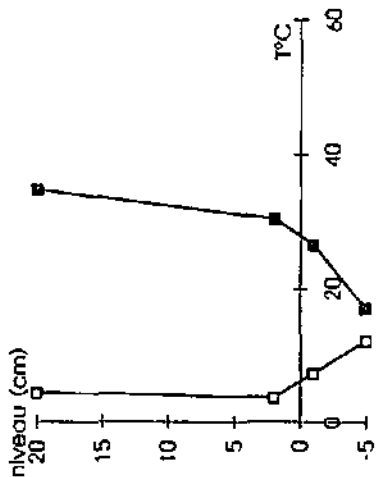
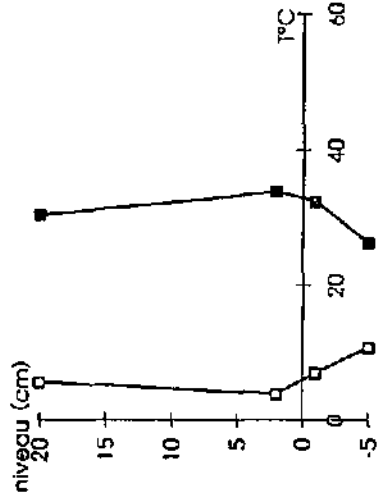
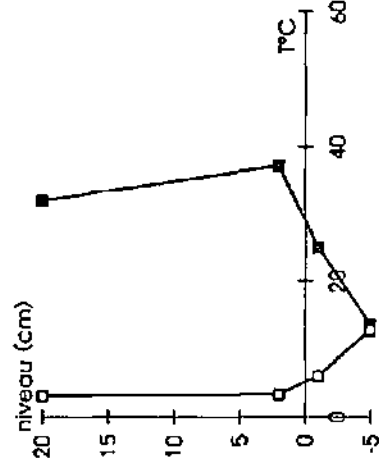
sommet du tourradon
 La Chaux-d'Abel



milieu ouvert, plat
 La Chaux-d'Abel



A) absence de sphaigne sur le sol dans les faciès testés 9-10 juillet 1991



B) présence de sphaigne sur le sol dans les faciès testés 10-11 juillet 1991

6.2.5.2. En présence de sphaignes

A) Les variations thermiques estivales

La présence d'un tapis de sphaignes provoque d'importantes modifications microclimatiques au niveau du replat alors qu'au niveau de la butte, elles sont moindres. La figure 86 montre la nette convergence climatique de ces deux milieux. La température sous les capitulum du coussinet sphagnal du replat ouvert est en moyenne plus basse que celle des sphaignes couvrant le touradon (17.7°C et 19.1°C). Les fluctuations y sont également moins fortes. Dans la cavité, la moyenne journalière pour la température du coussinet de sphaignes est plus basse (16.2°C), mais en comparaison proportionnelle des valeurs obtenues en absence de sphaignes, nous pouvons affirmer que la présence des mousses dans un site totalement ombragé augmente la température relative de la surface du "sol". La différence entre les maxima de températures de la tourbe nue hors et dans la cavité est de 64.7%. En présence de sphaignes, la différence thermique entre les deux maxima n'est plus que de 19%. Les sphaignes captent donc mieux la chaleur de l'air ambiant que la tourbe.

RYDIN (1984) a montré expérimentalement le rôle important du degré d'humidité sur la baisse de température des coussinets de sphaignes. Il indique qu'en conditions ombragées et humides, la température de la surface des sphaignes est 3.5°C plus basse que celle de l'air à +2 cm alors qu'avec des sphaignes sèches mais le même ombrage, la température du coussinet est 5.4°C plus haute que l'air. Nos données confirment ce résultat. Dans la cavité, la température des sphaignes reste nettement plus froide que celle de l'air (3.7°C en moyenne), avec des maxima très différents de 26.5°C pour le coussinet et de 40.2°C pour l'air. Nous ne pouvons pas discuter l'autre partie de l'expérience de RYDIN car nous n'avons pas de valeurs pour des sphaignes ombragées et sèches.

Les sphaignes du replat comme celles couvrant le touradon sont soumises à une forte dessiccation ce qui provoque un échauffement assez important des capitulum. Néanmoins, la protection du touradon maintient un échauffement plus faible pour la surface du sol que pour l'air à +2 cm. Le gradient thermique au-dessus du sol est inversé pour les deux milieux ouverts avec l'apparition de sphaignes. L'air devient plus froid à +2 cm qu'à +20 cm quand il y a les sphaignes. Les valeurs propres sont toutefois suffisamment peu différentes pour créer un véritable changement dans le fonctionnement climatique général (évaporation en particulier). Le tapis de sphaignes, par l'humidité et l'évaporation qu'il provoque rafraîchit l'air de contact alors que la tourbe nue ou les tiges feuillées sèches de la butte échauffent cet couche d'air.

B) Les variations d'humidité relative de l'air

L'humidité relative moyenne de la journée de mesures a été un peu plus faible à +20 cm (-5.5%) que lors du cycle de mesures en absence de sphaignes. Au niveau du sol, l'humidité moyenne est proportionnellement plus haute pour les trois milieux, montrant par là le rôle humidifiant des coussinets de sphaignes. Ce fait n'est pas étonnant vu la relation thermique précédente. L'augmentation est de 3.1% pour le sommet du touradon (rôle régulateur important des sphaignes vu la nature du milieu) et de 0.8% dans la cavité qui, avec 84.5% d'humidité moyenne sur 24h et un minima de 35.7% indique une très petite période "sèche".

Tableau 31: Résultats microclimatiques relatifs aux gazons de mousses

Résultats concernant les influences microclimatiques des gazons de *Polytrichum strictum*
 replat ouvert avec coussinet de sphaignes, gazon de *Polytrichum strictum*, butte à sphaignes
 (les moyennes sont calculées sur 24h avec 288 mesures)

Saison	Situation	Dates	Température (°C)									Humidité relative (%)						Evapo. (ml/h)	
			-5 cm			+2cm			+20cm			+2cm		+20cm		+2cm	+20cm		
			moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	moy./h	moy./h	
Print.	replat à Sphaignes		non déterminé																
	gazon de <i>Polytrichum strictum</i>	12-13/05/92	7.7	10.3	6.0	11.4	30.9	-4.2	11.2	29.4	-3.6	62.7	87.3	30.9	65.4	97.2	22.0	0.44	0.78
	butte à sphaignes	12-13/05/92	9.4	13.5	6.5	12.1	31.7	-3.6	11.3	28.9	-3.5	63.6	92.1	30.3	60.0	90.5	20.7	0.93	1.22
Été	replat à Sphaignes	11-12/07/91	1.46	17.4	11.6	18.1	33.3	3.5	20.1	37.7	4.0	73.2	98.4	31.2	68.8	99.3	25.7	0.40	0.64
	gazon de <i>Polytrichum strictum</i>	22-23/07/91	19.2	23.3	15.8	15.9	31.2	0.2	16.7	32.4	1.7	73.6	99.0	30.8	68.0	99.2	24.2	0.54	0.65
	butte à sphaignes	22-23/07/91	17.4	21.0	14.2	16.5	30.9	1.5	17.0	31.8	1.7	75.4	99.8	37.4	72.9	110.0	30.9	0.45	0.65
Aut.	replat à Sphaignes	9-10/10/91	9.9	19.1	5.9	10.5	29.3	-0.5	12.6	30.4	-0.3	75.3	94.3	37.9	66.0	95.6	27.1	0.25	0.62
	gazon de <i>Polytrichum strictum</i>	31/10-1/11/91	4.2	5.3	3.7	-3.4	0.9	18.0	-7.0	1.3	18.4	78.9	93.3	37.8	80.5	95.6	33.2	néant	néant
	butte à sphaignes	31/10-1/11/91	5.3	6.3	4.7	-2.9	1.4	18.1	-7.3	1.8	19.1	82.1	96.9	31.2	82.9	98.5	31.0	néant	néant

C) Les variations d'évaporation

Les valeurs obtenues pour l'évaporation sont identiques en présence et en absence de sphaignes (tab. 30). Ce résultat confirme le rôle primordial des sphaignes pour la protection du sol, et ce, principalement en surface, mais leur faible influence sur la couche d'air sus-jacente, en moyenne journalière. La diminution thermique de la couche d'air en contact avec le sol ne permet pas de mettre en évidence une baisse d'évaporation, vu sa faible valeur. Le facteur "vent" n'est pas pris en compte en été car nous ne possédons pas d'informations suffisantes quant à son influence éventuelle sur les deux régimes d'évaporation.

En automne par contre, l'augmentation nette d'évaporation entre les deux situations testées à +20 cm est dictée par une différence dans la force des vents au sol. Lors de la mesure en présence de sphaignes, un vent de 8 km/h de secteur est (bise asséchante) était mesuré jusqu'au niveau +20 cm, durant la journée. L'évaporation à cette hauteur est 2.5 fois plus importante que le jour précédent, calme. Les mesures prises au niveau du sol (surface ouverte) donnent les mêmes valeurs. Un léger gradient se marque entre le sol et l'évaporimètre placé au niveau de la cabane météo à 1.5 m du sol. Les résultats sont donc très difficiles à extrapoler.

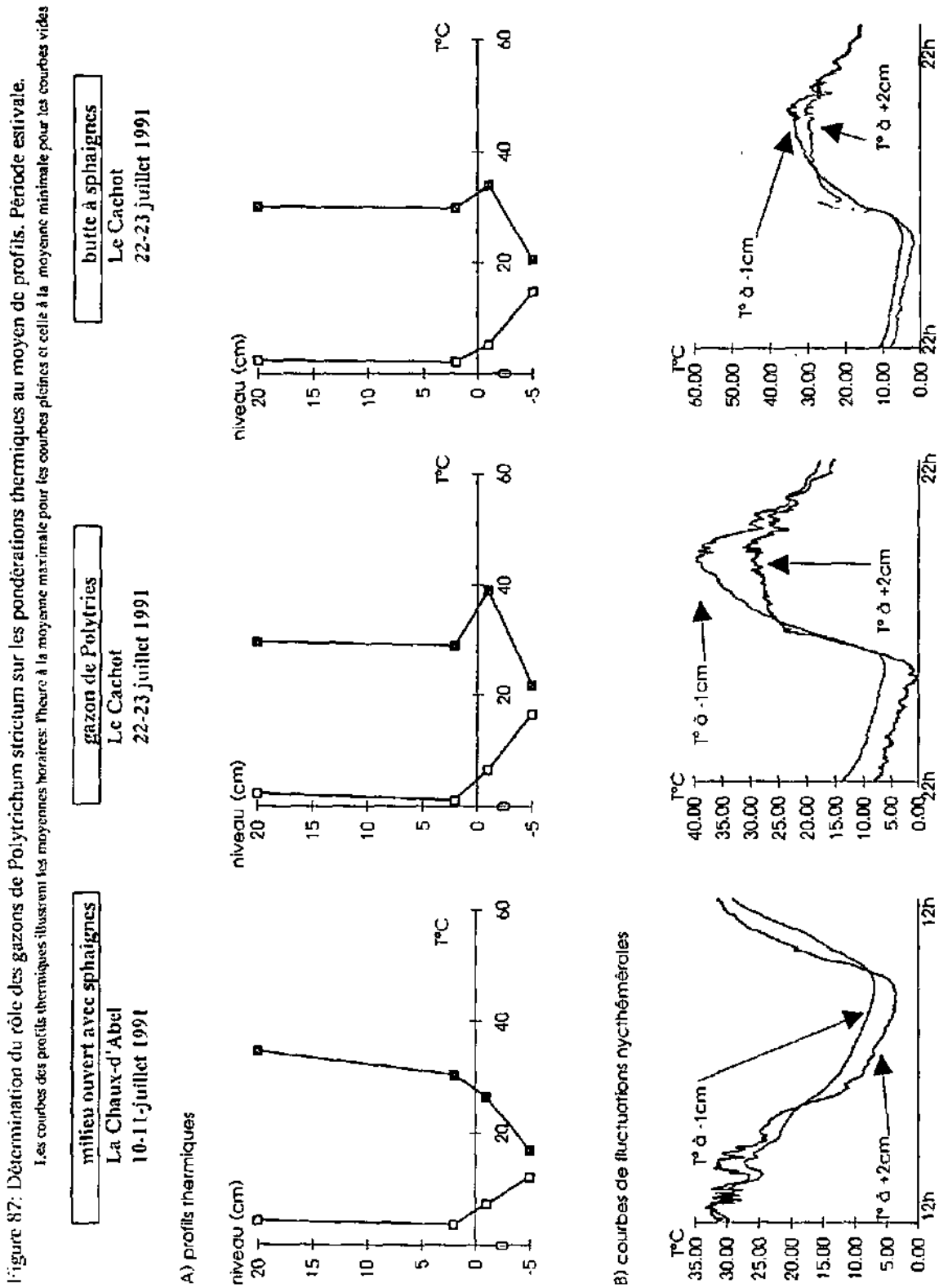
6.2.6. Caractéristiques microclimatologiques des gazons muscinaux à *Polytrichum strictum*

La spécificité des gazons muscinaux à *Polytrichum strictum* réside dans leur forte capacité de colonisation de milieux pionniers et écologiquement hostiles, en particulier les bordures supérieures des murs d'exploitation, dénudés et asséchés. Nous avons déjà présenté les caractères climatiques propres aux surfaces de tourbe nue. Nous ne reviendrons donc pas ici sur ces valeurs extrêmes. Il nous paraît par contre intéressant de comparer les spécificités microclimatiques du gazon de *Polytrichum* monospécifique, cicatrisant une ancienne tourbe nue, avec un replat ouvert, couvert d'un coussinet de sphaignes, et avec le stade évolutif final, défini comme une jeune butte à sphaignes couvrant un gazon de *Polytrichum* moribond (fig 43). Le tableau 31 rassemble les données de ces trois faciès et la figure 87 compare les profils thermiques et les fluctuations des cycles nyctéméraux.

A) Les variations thermiques estivales

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la présence d'un petit coussinet de sphaignes sur une surface décalottée suffit à modifier drastiquement les conditions thermiques à la surface du sol. La figure 87 montre que la température diurne des capitulum bien humides reste au même niveau que celle de l'air de contact, avec une moyenne horaire pour l'heure la plus chaude légèrement plus favorable à la couche d'air. La présence d'un gazon de *Polytrichum* par contre ne permet pas une telle pondération thermique et la surface des mousses montre un échauffement important, avec un maxima de 39.8°C. Il est délicat de comparer strictement les valeurs puisqu'ici, les mesures n'ont pas toutes été prises le même jour et sur le même site. Par contre, il est significatif de noter que l'échauffement du gazon de *Polytrichum* est supérieur à celui de la surface de tourbe nue du Cachot, mesuré en parallèle, les deux faciès étant séparés de 5 mètres environ. Cet échauffement est également notable par rapport à la situation de surface de la jeune butte à sphaignes, également échantillonnée en même temps et immédiatement à côté. Celle-ci montre également un échauffement des capitulum supérieur à celui de l'air de contact mais dans des proportions moindres. Nous calculons une moyenne journalière de 4°C sup. pour le sol des *Polytrichum* par rapport à l'air à +2 cm alors que pour la butte cette augmentation moyenne est de 1.4°C. La perte de chaleur nocturne est

Figure 87: Déterminisme du rôle des gazons de mousses sur les pondérations thermiques



par contre plus importante pour la butte à sphaignes avec un minima de 4.9°C contre 6.2°C pour le gazon de Polytrics.

MATTHEY W. (1964) considère fonctionnellement ces gazons comme de grandes buttes très lâches et très ouvertes dont l'échauffement est surtout important vers la profondeur en comparaison des buttes à *Sphagnum fuscum* bien serrées et structurées. Il mesure 21°C à -5 cm sous le gazon lâche et 18°C à la même profondeur sous la butte (moyenne de 17 jours consécutifs en juillet 1961). Nos données confirment ces résultats et les ordres de grandeur. **Les influences microclimatiques des gazons de Polytrics sont thermiquement moins importantes que celles des coussinets humides de sphaignes.** Même sans comparaison chiffrée stricte, le nivellement thermique diurne des sphaignes de la Chaux-d'Abel, par rapport à l'extrême chaleur de la tourbe nue est nettement plus important que celui du gazon de Polytrics au Cachot, par rapport aux caractéristiques de la tourbe nue de ce site.

B) Les variations thermiques automnales et vernales

En automne, le gazon de Polytrics a montré une remarquable baisse de température, avec une moyenne journalière négative en surface. **Ses fluctuations thermiques sont donc plus importantes que celles des surfaces couvertes de sphaignes** et suivent plus fidèlement et directement les mésoclimats saisonniers. Au printemps, le sol est déjà plus chaud que celui de la butte avec une température inférieure pour l'air de contact. Contrairement à l'automne, la température du sol est déjà plus haute que celle de l'air pour les jours de mesures.

C) Les variations d'humidité relative de l'air

Du point de vue de l'humidité relative, les différences saisonnières sont les mêmes avec un air plus sec au-dessus du gazon de Polytrics en été et au printemps par rapport au tapis de sphaignes. Cette observation n'est pas surprenante et confirme les considérations de MATTHEY W. (1964). L'humidité automnale plus forte est évidemment liée aux basses températures enregistrées. Il est intéressant de noter qu'au printemps, le maxima n'est que de 87.3% au-dessus du gazon de Polytrics, ce qui indique que la saturation n'est pas atteinte au niveau du sol. **Aucun autre faciès étudié n'a donné de chiffre aussi bas pour le niveau +2cm.**

D) Les variations d'évaporation

MATTHEY W. (1964) indique une évaporation plus importante des structures lâches à Polytrics par rapport aux tapis de sphaignes. Nous mesurons en effet 0.54 ml/h d'évaporation en surface de *Polytrichum strictum* contre 0.45 ml/h au-dessus des sphaignes de la jeune butte, pour la journée d'été. Bien que non strictement comparable, la valeur pour le coussinet sphagnal du replat ouvert de La Chaux-d'Abel est également de 0.40 ml/h. Comme les valeurs à +20 cm sont identiques pour les trois milieux (0.65 ml/h) et que nous avons des chiffres parfaitement identiques au niveau des cabanes météo aussi bien à la Chaux-d'Abel qu'au Cachot, nous pouvons considérer que **le gazon muscinal provoque bien une évaporation un peu supérieure au tapis sphagnal.** Au printemps par contre, il y a une différence assez nette avec une moins grande évaporation au-dessus du gazon muscinal (0.44 ml/h) par rapport à la butte à sphaignes (0.67 ml/h) au niveau du sol. L'humidité y est plus basse pour la moyenne journalière mais présente un minima nettement plus humide (30.9%) que pour la butte à sphaignes (19.9%). Ce fait, couplé à la température déjà un peu plus élevée indique que **le gazon de Polytrics peut maintenir en début de saison des conditions très favorables à la croissance des mousses.** PROCTOR (1982) indique que *Polytrichum strictum* a une croissance optimale entre 5 et 15°C (moyenne des mesures printanières chez nous) alors que

Tableau 32: Résultats microclimatiques relatifs aux bordures des fosses d'exploitation

Résultats des relations microclimatiques en bordure des fosses d'exploitation
 marais tremblant inondé, marteau préforestier à sphaignes, forêt secondaire sèche. (les moyennes sont calculées sur 24h avec 288 mesures)

Saison	Situation	Dates	Température (°C)									Humidité relative (%)						Evapo. (ml/h)				
			-5 cm			+2cm			+20cm			+2cm		+20cm		+20cm						
			moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	moy./h	moy./h				
Print.	marais tremblant	16-17/05/92	11.3	12.1	11.0	15.1	28.7	7.4	14.9	26.4	7.6	14.8	24.0	7.6	86.9	96.6	61.1	76.1	94.7	44.4	0.13	0.31
	marteau de Vac.	16-17/05/92	11.1	12.6	10.0	15.1	30.1	6.6	15.1	27.6	6.9	15.5	26.1	7.6	83.9	99.4	46.1	72.0	94.6	40.0	0.16	0.28
	Forêt secondaire	16-17/05/92	11.5	12.3	10.7	14.7	23.4	10.8	16.2	29.1	9.0	15.5	26.4	8.7	69.4	91.9	38.1	75.6	97.5	39.9	0.18	0.31
Été	marais tremblant	28-29/07/91	15.9	19.3	13.4	16.4	27.6	10.1	14.7	30.2	4.7	15.0	30.8	4.6	80.9	98.6	31.4	80.0	98.3	35.0	0.22	0.30
	marteau de Vac.	28-29/07/91	13.6	14.8	12.6	14.3	32.6	5.2	13.5	29.3	3.8	14.6	30.7	4.6	93.0	110.0	55.8	85.8	110.0	42.4	0.11	0.19
	Forêt secondaire	28-29/07/91	13.1	14.8	11.7	13.9	20.1	9.4	14.6	29.1	5.7	14.5	25.8	5.4	91.8	110.0	51.5	86.7	110.0	45.8	0.05	0.15
Aut.	marais tremblant	13-14/10/91	9.0	10.7	7.8	7.2	20.7	2.7	5.8	22.2	0.3	5.4	20.5	-0.4	97.5	110.0	80.5	95.7	98.9	73.7	néant	néant
	marteau de Vac.	13-14/10/91	8.4	9.9	7.3	5.9	13.4	1.7	5.2	15.8	-0.2	5.0	16.1	-0.6	95.3	97.9	89.5	95.4	98.3	66.0	néant	néant
	Forêt secondaire	13-14/10/91	8.3	9.7	7.0	7.3	10.7	4.7	5.8	13.9	1.1	5.4	15.9	0.3	100.9	110.0	98.7	98.3	110.0	81.5	néant	néant

pour *Sphagnum fuscum* et *S. magellanicum* l'optimal est de 15 et 18°C (moyenne estivale pour nous). Ainsi, nous pouvons considérer que le dynamisme de croissance de *Polytrichum strictum* est principalement concentré au printemps, ce que nos observations visuelles semblent confirmer. En effet, les gazons de Polytrichs sont humides et verts lumineux au printemps. Dès les premières chaleurs prolongées importantes, les feuilles se condensent le long des tiges. Leur couleur devient terne et vert-noirâtre, avec une structure cassante sous le pied. Seuls les orages d'été permettent à ces gazons de retrouver l'aspect vernal, mais pour de courtes périodes uniquement.

6.2.7. Approches microclimatologiques des couverts de chaméphytes et des structures boisées

Les fosses d'exploitation de Bellelay présentent une dynamique de régénération à la fois verticale, par l'augmentation importante de l'épaisseur de tourbe jeune, et horizontale par le fait que la croissance est actuellement suffisante pour permettre une extension latérale du tapis de sphaignes. La plupart de ces fosses montrent une végétation structurée en lisière avec une couverture sphagnale pénétrant un peu au niveau des forêts secondaires (c.f. chap. 3.5.). L'analyse stratigraphique montre en effet que l'épaisseur de tourbe jeune est très peu importante sous les sphaignes vivantes et très dynamiques au niveau du manteau et de l'ourlet préforestier (c.f. chap. 4.3.). Dès lors, nous avons cherché à mettre en évidence les différents fonctionnements microclimatiques le long de ce gradient dynamique.

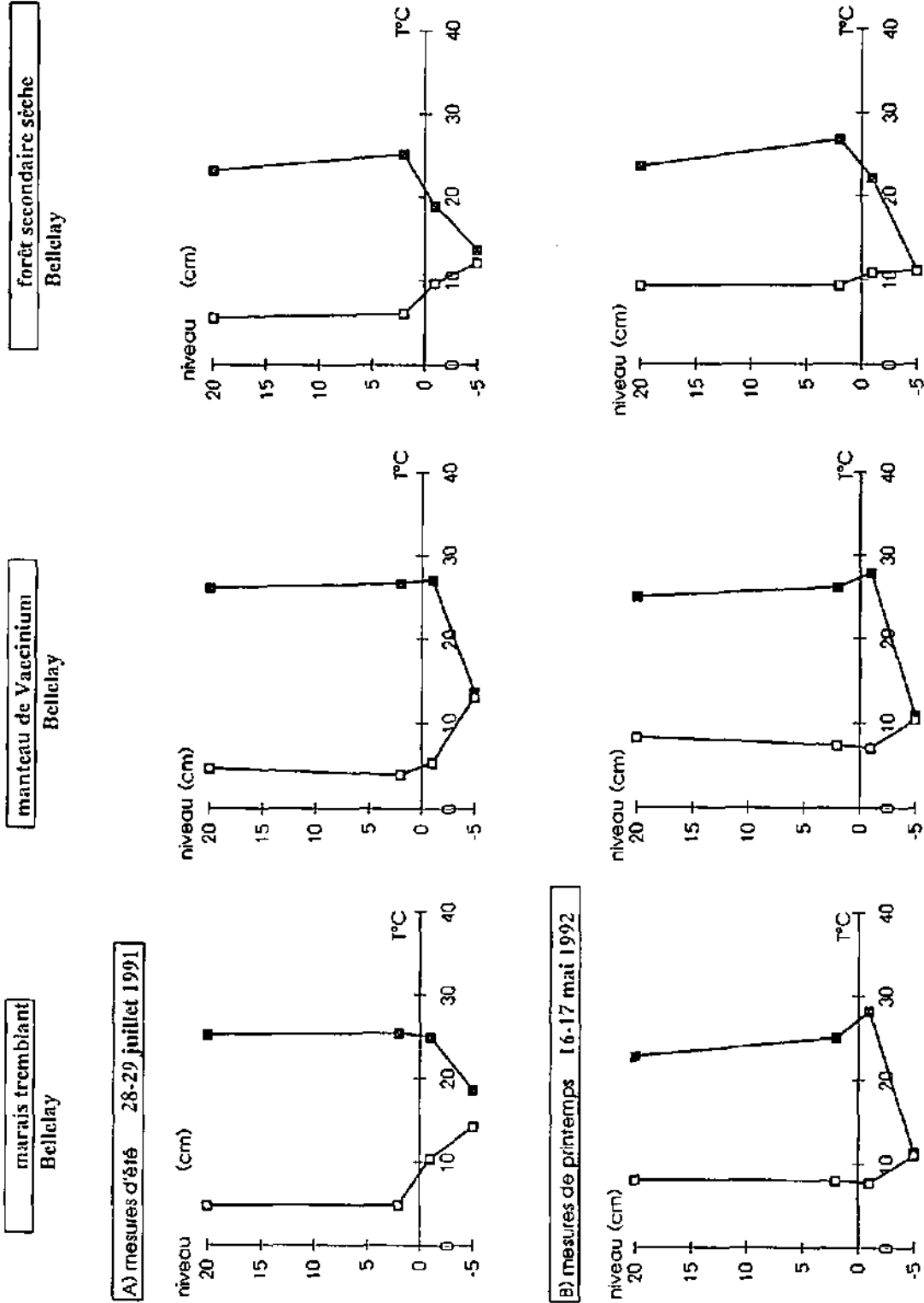
Les relations subtiles entre le degré d'humidité du tapis de sphaignes, l'ombrage porté et la température de la surface du sol (donc par relation la productivité des sphaignes) ont été abordées par SCHMEIDL (1978) et RYDIN (1984). Sans ombrage, l'air s'échauffe plus au-dessus de sphaignes sèches qu'humides (différence buttes-gouilles) car l'eau utilise près de 73% de l'énergie pour se chauffer elle-même (SCHMEIDL, 1978). Selon les travaux de RYDIN (1984), pour un ombrage équivalent, la température des sphaignes humides reste inférieure à celle de l'air (pour les maxima) alors que les sphaignes sèches ont une surface plus chaude que la couche d'air.

A) Les variations thermiques estivales

Nos résultats, exprimés sur le tableau 32 et sur la figure 88, montrent qu'en été, les relations thermiques sol-air pour les maxima sont inversées entre le marais tremblant et le manteau à *Vaccinium* alors qu'en forêt, on retrouve une situation similaire à celle du marais tremblant. Les moyennes thermiques de la surface du sol, pour 24 heures, montrent un gradient dégressif du centre de la fosse (16.4°C) vers la forêt (13.9°C). Ces moyennes montrent bien la protection par la forêt, pour un sol dénudé. L'augmentation thermique de l'air au-dessus du sol forestier est faible par rapport au maxima mesuré à +20 cm (25.8°C), ces deux valeurs exprimant assez bien celle de l'air ambiant (mésoclimat). Pour la fosse, il y a une forte pénétration de lumière et d'énergie jusqu'au sol. L'humidité importante des sphaignes limite l'échauffement de surface. La température maximale reste 2.6°C plus basse que celle de l'air de contact. LELOUP & JACQUEMART (1963) indiquent que les forêts laissent passer plus d'énergie au sol (5%) que les couvertures de *Vaccinium* (2.5%) ou les touradons de *Molinia caerulea* et d'*Eriophorum vaginatum* (1.5%). Sous le couvert du manteau préforestier, la température des sphaignes montre un maxima plus grand (32.6°C) que celui de l'air (29.3°C). La différence de 3.3°C est faible par rapport à celle mesurée par RYDIN (1984) pour l'ombrage le plus efficace (soit 65 à 70% de lumière interceptée). Ces valeurs montrent que les sphaignes de la fosse sont très humides et peuvent rester assez fraîches alors que celles qui colonisent la bordure sont plus sèches mais ont un comportement

Figure 88: Déterminisme du rôle des structures ligneuses sur les pondérations thermiques

Les courbes des profils thermiques illustrent les moyennes horaires: l'heure à la moyenne maximale et celle à la moyenne minimale pour les courbes vicées



attestant le maintien d'une humidité assez importante (par comparaison avec les amplitudes de RYDIN). L'ombrage est alors important pour éviter un trop fort échauffement de l'air de contact, celui-ci restant plus frais qu'au-dessus de la fosse. Pour les minima, le degré d'humidité joue un rôle parfaitement complémentaire avec une amplitude très faible pour le sol du marais tremblant qui reste assez chaud la nuit (min de 10.1°C) alors que le sol du manteau libère beaucoup de chaleur et se refroidit fortement (jusqu'à 5.2°C).

B) Les variations thermiques automnales et vernales

Au printemps, comme le montre la figure 88, les deux tapis de sphaignes s'échauffent plus fortement que le sol de la forêt. Le feuillage des sous-arbrisseaux n'était pas encore développé le jour de la mesure, laissant passer la lumière et la chaleur jusqu'au sol. Malgré l'humidité du sol, les capitulum s'échauffent plus que l'air sus-jacent. De plus, ces deux milieux présentent les seuls cas où la température minimale de la surface du sol a été plus froide que celle de l'air de contact. Il y a donc un net changement de comportement climatique sous le manteau grâce à la qualité saisonnière de l'ombrage. En automne la baisse de température pour la surface du sol comme pour l'air sus-jacent est plus marquée pour le manteau que pour le marais tremblant. La forêt reste plus chaude, ce qui est normal.

C) Les variations d'humidité relative de l'air et d'évaporation

L'humidité relative de l'air et l'évaporation montrent également le changement de comportement saisonnier du manteau par rapport à la fosse. En été, l'air de la fosse, a un comportement uniforme à +2 cm et à +20 cm, avec un net assèchement diurne, mais sur de courtes périodes, la moyenne journalière restant élevée. L'évaporation est élevée pour l'endroit durant la journée. Sous le manteau par contre, la saturation est quasi permanente avec une moyenne de 93% au sol et une évaporation de 0.11 ml/h, ce qui est 50% inférieur à celle de la fosse. La forêt, très calme et ombragée, au sol frais, bien que sèche, n'évapore pour ainsi dire pas avec une valeur minimale de 0.05 ml/h. Le taux d'humidité de l'air s'y maintient du reste également très haut. Au printemps par contre, l'air ambiant était nettement plus sec sous le couvert forestier, avec une évaporation assez élevée (0.18 ml/h), à mettre en relation avec la chaleur de l'air. Sous le manteau, la forte chaleur des capitulum et la faible protection du feuillage permettent un assèchement diurne important et une évaporation moyenne (0.16 ml/h), plus haute qu'en été. Au-dessus de la fosse, l'humidité reste forte, avec une moyenne plus haute qu'en été. Il y a donc ici encore inversion entre les saisons et le comportement des milieux. Pour l'automne, il est impossible d'interpréter les chiffres vu le climat général des jours précédents, pluvieux et assez chaud. La forte saturation exprime encore nettement cette caractéristique.

6.2.8. Synthèse et discussion

Nous avons déjà abordé la discussion des résultats lors de leur présentation si bien que nous ne reviendrons pas ici sur l'ensemble des concepts. Le tableau 33 présente une synthèse des résultats principaux avec les amplitudes thermiques journalières. Nous signalerons simplement, sans détails excessifs, que l'aspect microclimatique de nos faciès principaux prouve parfaitement les résultats acquis précédemment dans les autres chapitres.

Ainsi, même dans des milieux secondaires, asséchés artificiellement, nous retrouvons les fluctuations nyctémérales entre humidité et température, marquant les caractéristiques de conductibilité thermique propre aux hauts-marais. Nos nombreuses observations des tourbières jurassiennes et

Tableau 33: Résultats micrométéorologiques synthétiques

Résultats synthétiques pour l'ensemble des milieux significatifs testés

Milieux testés		Printemps				Ete				Automne			
		Temp. moy. (°C)	Temp. fluctu. (°C)	Hum. (%)	Evapo. ml/h	Temp. moy. (°C)	Temp. fluctu. (°C)	Hum. (%)	Evapo. ml/h	Temp. moy. (°C)	Temp. fluctu. (°C)	Hum. (%)	Evapo. ml/h
A) terrestres													
t. nue sans sphaignes	+20 cm	14.8	31.6	61.8	0.65	18.1	24.0	72.0	0.80	7.5	27.9	76.4	0.25
t. nue sans sphaignes	+ 2cm	15.5	32.5	68.6	0.62	18.5	29.8	72.2	0.49	7.2	26.8	75.8	0.23
t. nue sans sphaignes	-1 cm	16.5	28.8			23.9	48.8			10.3	20.1		
t. nue sans sphaignes	-5 cm	13.5	8.8			15.7	7.2			10.0	8.9		
replat avec sphaignes	+20 cm	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	20.1	33.7	99.3	0.64	12.6	30.7	66.0	0.62
replat avec sphaignes	+ 2cm	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.1	29.8	73.2	0.40	10.5	29.8	75.3	0.25
replat avec sphaignes	-1 cm	n.d.	n.d.			17.7	25.7			10.0	17.8		
replat avec sphaignes	-5 cm	n.d.	n.d.			14.6	5.8			9.9	13.2		
cavité sans sphaignes	+20 cm	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.6	28.9	71.0	0.65	7.2	29.7	80.6	0.25
cavité sans sphaignes	+ 2cm	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	20.4	32.3	83.8	0.18	6.7	18.5	92.2	0.05
cavité sans sphaignes	-1 cm	n.d.	n.d.			15.4	8.4			8.5	4.3		
cavité sans sphaignes	-5 cm	n.d.	n.d.			13.1	1.0			8.9	4.2		
cavité avec sphaignes	+20 cm	14.9	34.5	65.3	0.61	19.1	35.0	67.5	0.51	12.4	29.2	67.5	0.54
cavité avec sphaignes	+ 2cm	13.7	36.2	68.4	0.22	19.9	37.1	84.5	0.16	9.3	25.9	86.5	0.06
cavité avec sphaignes	-1 cm	9.8	13.1			16.2	20.7			8.4	12.2		
cavité avec sphaignes	-5 cm	7.7	3.1			13.9	2.9			8.2	2.8		
gazon de P. stricium	+20 cm	11.2	32.4	65.4	0.78	16.7	30.7	68.0	0.65	1.3	25.8	80.5	n.d.
gazon de P. stricium	+ 2cm	11.4	35.3	62.7	0.44	15.9	31.0	73.6	0.54	0.9	25.0	78.9	n.d.
gazon de P. stricium	-1 cm	13.9	31.4			19.9	33.6			-0.5	11.8		
gazon de P. stricium	-5 cm	7.7	7.0			19.2	7.5			4.2	1.6		
butte à sphaignes	+20 cm	11.3	32.4	60.0	1.22	17.0	30.1	72.9	0.65	1.8	26.3	82.9	n.d.
butte à sphaignes	+ 2cm	12.1	35.3	63.6	0.93	16.5	29.4	75.4	0.45	1.4	25.4	82.1	n.d.
butte à sphaignes	-1 cm	13.3	31.4			17.9	30.5			0.9	13.0		
butte à sphaignes	-5 cm	9.4	7.0			17.4	6.8			5.3	1.6		
b) aquatiques													
tapis de sphaignes	+20 cm	14.8	16.4	76.1	0.31	15.0	26.2	80.0	0.30	5.4	20.9	95.7	n.d.
tapis de sphaignes	+ 2cm	14.9	18.8	86.9	0.13	14.7	25.5	80.9	0.22	5.8	21.9	97.5	n.d.
tapis de sphaignes	-1 cm	15.1	21.3			16.4	17.5			7.2	18.0		
tapis de sphaignes	-5 cm	11.3	1.1			15.9	5.9			9.0	2.9		
couvert de Vaccinium	+20 cm	15.5	18.5	72.0	0.28	14.6	26.1	85.8	0.19	5.0	16.7	95.4	n.d.
couvert de Vaccinium	+ 2cm	15.1	20.7	83.9	0.16	13.5	25.5	93.0	0.11	5.2	16.0	95.3	n.d.
couvert de Vaccinium	-1 cm	15.1	23.5			14.3	27.4			5.9	11.7		
couvert de Vaccinium	-5 cm	11.1	2.6			13.6	2.2			8.4	2.6		
forêt asséchée	+20 cm	15.5	17.7	75.6	0.31	14.5	20.4	86.7	0.15	5.4	15.6	98.3	n.d.
forêt asséchée	+ 2cm	16.2	20.1	69.4	0.18	14.6	23.4	91.8	0.05	5.8	12.8	100.0	n.d.
forêt asséchée	-1 cm	14.7	12.6			13.9	10.7			7.3	6.0		
forêt asséchée	-5 cm	11.5	1.6			13.1	3.1			8.3	2.7		

Temp. moy. = Température moyenne journalière
Temp. fluctu. = Amplitude maximale du jour

les résultats de ces recherches fines nous permettent d'affirmer que **l'humidité relative de l'air est plus en relation avec le mésoclimat lié à la présence de la tourbière elle-même qu'avec les micromilieus qu'y s'interpénètrent en mosaïque.**

La taille du haut-marais est à cet égard primordiale pour assurer le maintien des fortes humidités nocturnes et matinales. Pour les marais de *grande taille* (quelques hectares), le mésoclimat induit permet la saturation au-dessus et aux alentours du marais. L'autorégulation est possible. Au-dessous d'une *taille critique*, à déterminer avec précision pour le Jura, le haut-marais devient totalement tributaire du mésoclimat des terrains agricoles et le nombre de jours de rosée et de brouillards matinaux baisse. Parallèlement, les fluctuations thermiques diminuent et la végétation perd sa protection face à la concurrence des plantes de prairie. Comme la diminution de taille des marais est directement liée aux exploitations de tourbe et à la mise en culture des terrains externes,

la dynamique de la régénération est également liée à l'importance spatiale des atteintes, et non seulement à l'épaisseur et à la qualité de la tourbe résiduelle.

PRODZOROVA (1988) a mis en évidence, par des tests de laboratoire, le rôle conjugué de la température et de l'humidité relative pour la rapidité de la minéralisation de la tourbe, montrant une diminution de la minéralisation par une baisse de la température et de l'humidité. EGGELSMANN (1978) montre que la vitesse d'oxydation est liée à la relation entre les précipitations annuelles et température moyenne (selon LANG 1915, in EGGELSMANN, 1978). Plus la température augmente, et plus l'oxydation et la perte de matière (tassement, diminution de l'épaisseur du sol) sont importantes. Ces deux travaux montrent bien l'importance du mésoclimat voir du macroclimat pour la survie à long terme des hauts-marais.

Les travaux de PESSI (1958) montrent que le rôle des influences anthropiques se marque sur les caractéristiques microclimatiques des hauts-marais, en particulier le drainage, dont l'abaissement de la nappe phréatique augmente la profondeur du gel ainsi que sa durée saisonnière. PESSI (1958) indique que le drainage abaisse la température en profondeur du sol. Ce résultat indiquerait donc une diminution de la minéralisation de la tourbe (donc une bonne protection des sols organiques), ce qui est nettement à pondérer par rapport à l'augmentation de l'oxygénation en profondeur. Pour ces milieux drainés et non drainés, il serait intéressant de comparer les prédictions de LANGHOLZ (1989). Cet auteur a développé un modèle prédictif de la température moyenne journalière du sol au moyen de relations linéaires avec la température de l'air. LELOUP & JACQUEMART (1963) avaient déjà montré la forte corrélation (0.87) entre la température du sol à -5 cm et la température de l'air à +200 cm. Pour LANGHOLZ (1989), il est possible de définir des relations sur le type

$$T_{sol} = a \cdot T_{air} + b$$

pour plusieurs profondeurs, avec les meilleurs résultats entre -5 cm et -10 cm. Les relations calculées ne sont valables que pour un site donné car le degré d'humidité est important pour les valeurs. Pour les calculer avec précision, il faut effectuer des mesures en continu sur plusieurs années puis extrapoler par les moyennes mensuelles, voir bimensuelles en été.

Au niveau microclimatique, si l'humidité relative n'est pas un facteur primordial de différenciation, la température, et plus encore l'évaporation au niveau du sol, montrent des différences notables

d'un faciès à l'autre. Pour l'été, il y a une **relation de 1:3.8 entre les faciès à évaporation maximale et minimale** ce qui représente des volumes d'eau évacués très différents. Les variations thermiques, aussi bien pour la surface du sol que pour la couche d'air de contact sont importantes, mais n'atteignent pas de telles proportions.

A) La série des touradons

Pour la série des touradons, nous pouvons différencier le rôle climatique général du milieu et le rôle induit par les touradons sur les faciès créés (cavité, replat, ..). La structure de creux et de bosses de ce milieu augmente sensiblement le développement de la surface du sol et crée une protection structurale par une diminution des déplacements d'air, un contraste important de couleur (albedo de la tourbe et des litières très tranché avec réflexion et accumulation de chaleur différentes) et des mini opposition de versant, avec la création d'ombrages temporaires et permanents aux rôles très importants (SCHMEIDL 1978). Par rapport aux petits milieux spécifiques créés, il y a un net gradient climatique entre les replats de tourbe dénudés, le sommet du touradon et les cavités formées par la litière. En présence de sphaignes, la forte baisse de température du sol dans la cavité est limitée, ce qui montre bien le rôle de ces mousses dans l'accumulation de chaleur. A l'extérieur par contre, les coussinets de sphaignes assurent une protection thermique efficace. Dès lors le rôle régulateur des sphaignes sur la température est démontré.

Les cavités apparaissent donc clairement comme particulièrement favorables à la régénération. De manière imagée, nous pouvons dire que la cavité favorise les sphaignes et qu'ensuite, les sphaignes régulent les conditions climatiques de la cavité. La température reste idéale pour la croissance végétale, l'humidité de l'air y est très forte pendant une grande majorité de la journée, l'insolation directe est très faible. Ces conditions sont les mêmes que celles décrites par LELOUP & JACQUEMART (1963) pour la litière de *Molinia caerulea*, ce qui atteste bien le rôle de la structure et non de l'espèce. FRANCEZ (1992) indique que la température des capitulum est importante pour la croissance tout comme le rayonnement solaire direct. Des valeurs trop hautes sont néfastes pour la productivité primaire des sphaignes.

RYDIN (1985) signale le rôle primordial de la température, de l'humidité et de l'insolation sur la photosynthèse et la croissance des sphaignes. Conséquence de la variation de ces trois facteurs, le degré et la rapidité de la dessiccation des coussinets et en particulier des capitulum sont modifiés. Il indique (tout comme les travaux de JOHANSSON & LINDER, 1980) que les espèces de replats (*S. recurvum* p ex.) sont plus tolérantes à la dessiccation que les espèces de buttes (*S. fuscum* p.ex.). WAGNER & TITUS (1984) indique qu'après 5 jours de sécheresse, 95% des individus de *S. recurvum* sont encore en vie contre 5% des individus de *S. capillifolium*. Du point de vue de la croissance, ces différences sont à pondérer par le fait que ces espèces ont une capacité photosynthétique adaptée (98% de la photosynthèse est effectuée dans le capitulum par *S. fuscum* contre 60% pour *S. balticum*, RYDIN 1984). HAYWARD & CLYMO (1983) considère quant à eux que la croissance optimale des sphaignes se fait quand 50-60% de la lumière sont absorbés. Cette relation avec l'irradiation solaire est montrée par MURRAY *et al.* (1989) qui ont calculé les corrélations entre la croissance des sphaignes et les facteurs climatiques principaux. Ils indiquent une valeur positive de 0.79 avec les précipitations, et des valeurs négatives de -0.6 pour la température et de -0.97 pour l'irradiation. Dans les cavités au pied des touradons, bien que n'ayant pas de mesures précises, on peut estimer que la croissance n'est pas optimale.

B) La série des gazons de mousses

Si l'importance climatique des touradons sur la dynamiques secondaire des sphaignes est bien mise en évidence, le rôle des gazons de mousses semble moins facile à mettre en exergue. En effet, le comportement estival du gazon de *Polytrichum strictum* est sensiblement le même que celui de la tourbe nue, avec un fort échauffement de la surface du sol, une forte évaporation (aussi importante que pour la surface dénudée) et un assèchement marqué près du sol. Néanmoins, *Polytrichum strictum* présente un fort pouvoir de colonisation des surfaces asséchées et très chaudes. PESSI (1958) indique que l'espèce qui cicatrise le plus rapidement les surfaces drainées (en particulier en 1956, année très sèche) est *Polytrichum strictum*. BOWDEN (1991) mesure expérimentalement la capacité des gazons de *Polytrichum* à fixer l'azote des pluies et à l'accumuler au niveau des premiers centimètres du sol (47% de l'azote inorganique a été capté par les échantillons dont le sol possède une forte proportion de matière organique). COLLINS (1976) met en évidence la forte capacité des gazons de *Polytrichum* à capter et à fixer l'humidité de l'air en créant au niveau du tapis végétal, un petit horizon saturé.

Nous avons déjà discuté la différence saisonnière de fonctionnement de ces gazons en relation avec les résultats microclimatiques. Dès lors, ceux-ci nous permettent de formuler l'hypothèse d'une alternance de périodes de forte activité et de diaposés durant la belle saison, avec une importance primordiale des conditions climatiques printanières pour la productivité primaire. Durant l'été, les fortes chaleur et la sécheresse provoquent une diapose passagère que les sphaignes isolées dans le tapis de *Polytrichum* subissent comme la matrice végétale principale. Pour nous, contrairement aux hypothèses de MATTHEY W. (1964, 1965, 1971), l'apparition des sphaignes peut se faire par pied isolé au sein des gazons muscinaux existants, grâce aux conditions microclimatiques vernaales favorables.

L'importance des pluies hivernales et du stock de neige pour la croissance printanière des sphaignes (signalée par FRANCEZ (1990)) s'expriment quant à la durée de la période de croissance printanière. En été, les sphaignes semblent mortes, tant leur couleur devient jaunâtre. Dès le retour de pluies abondantes et continues, le gazon de *Polytrichum strictum* peut à nouveau capter et retenir abondamment l'eau, pour assurer une période de croissance aux sphaignes. L'observation fine sur le site du Cachot montre que la compétition n'est pas en défaveur des sphaignes puisque celles-ci peuvent différencier des plages compacts puis élaborer des buttes avec modifications des espèces en fonction des conditions locales.

Au niveau de la jeune butte, nous avons pu mettre en évidence une productivité primaire estivale alors qu'au niveau des gazons, aucune croissance estivale n'a été mesurée (cf. Chap. 7)

C) La série des marais tremblants

Pour la série des marais tremblants, les facteurs microclimatiques apparaissent comme secondaires quant au dynamisme de la régénération, ce qui n'est pas vraiment surprenant compte tenu de la forte réserve en eau de ces milieux. A Bellelay, l'alternance régulière des fosses et des zones forestières plus sèches crée un mésoclimat nettement plus humide que sur les sites des séries terrestres. La forêt provoque un net ralentissement des vents au sol et les fosses assurent une humidité relative de l'air toujours plus élevée. L'évaporation à +20 cm (identique à celle mesurée au niveau de la cabane météo) est ainsi la moitié moins importante que pour les autres tourbières étu-

diées. Cette mesure ne permet dès lors qu'une comparaison entre les trois situations du bord de la fosse.

La protection jouée par le manteau de *Vaccinium uliginosum* en bordure de la fosse présente une similitude saisonnière évidente avec le rôle protecteur des gazons de mousses, mais cette fois quant à la température estivale. Il faut ici considérer que la colonisation latérale du tapis de sphaignes est favorisée en été par la forte protection de *Vaccinium*, qui assure une humidité plus haute et une température moyenne journalière plus basse que pour le tapis sphagnal de la fosse. Comme ces sphaignes sont nettement plus sèches, sans la couverture chaméphytique, la température serait nettement plus haute et défavorable. De plus, la protection contre l'excès de rayonnement solaire permet également d'augmenter la productivité primaire (FRANCEZ 1992).

SCHMEIDL (1978) montre que *Calluna vulgaris* est moins importante pour la protection thermique des tapis de sphaignes (comparaison de buttes couvertes et ouvertes) que *Vaccinium*. Ce résultat est à mettre en relation avec les données de LELOUP & JACQUEMART (1963) qui indiquent que *Calluna vulgaris* laisse passer 20% de lumière au sol contre 2,5% pour *Vaccinium*. BARCLAY-ESTRUP (1971) a montré quant à lui qu'il y a une relation entre les phases de croissance de *Calluna* (jeunesse, croissance, maturité et dégénérescence) et les variations microclimatiques mesurées sous la couverture chaméphytique. Il y a donc certainement une bonne complémentarité actuellement entre le manteau en pleine maturité et la croissance des sphaignes le long des fosses de Bellelay.

Nous terminerons ce chapitre en signalant l'importance primordiale de l'approche microclimatologique pour la compréhension des interrelations entre types de végétation et conditions physico-chimiques des sols. Force est de reconnaître que notre approche s'apparente plus à celle des entomologues (en particulier ceux qui s'intéressent à la pédofaune), qu'à celle des phytosociologues classiques. La faune invertébrée réagit de manière fine et ciblée aux conditions propres des microhabitats créés par l'évolution végétale. Dès lors, il n'est pas surprenant que les recherches micrométéorologiques soient principalement le fait d'entomologues et d'arachnologues, en relation avec la structure des milieux (LELOUP & JACQUEMART 1963, MATTHEY, W. 1971). Nous pouvons donc considérer que la liaison entre conditions pédologiques, hydrodynamiques et climatiques, en relation avec la structure végétale fine des stations, est une approche originale et que le volet micrométéorologique mérite à l'avenir une attention particulière, comme l'a déjà relevé WICKY en 1988.

7. PRODUCTION PRIMAIRE DES SPHAIGNES SUR LE TERRAIN

INTRODUCTION

La mesure de la croissance des sphaignes n'a pas pu faire l'objet d'une étude complète et détaillée en raison des difficultés rencontrées lors de l'adaptation de la méthode aux conditions de terrain qui caractérisent nos trois séries évolutives (chap. 1.6. et GROSVERNIER, 1996). Ces mesures de terrain sommaires s'intègrent en revanche parfaitement à l'analyse de la dynamique de la croissance des sphaignes. Elles sont alors très intéressantes, aussi bien méthodologiquement que par les valeurs comparatives qu'elles fournissent au volet "expérimentation" de la recherche globale menée entre 1989 et 1992 au sein de l'équipe du Laboratoire d'écologie végétale de l'Université de Neuchâtel.

Nous sommes dès lors très reconnaissant à Ph. Grosvernier de nous avoir communiqué l'ensemble des résultats de croissance de terrain afin que nous puissions les présenter dans notre travail. Nous considérons ces valeurs et leurs variations comme illustratives et intégratives des conditions écologiques induites aussi bien par la qualité du sol, la dynamique des nappes phréatiques que par les caractéristiques microclimatiques des stations.

7.1. METHODE

Les méthodes sont présentées en détail par GROSVERNIER (1996) et reprises au chapitre 1.6. Nous n'y reviendrons pas ici.

7.2. RESULTATS

7.2.1. Les mesures de croissance de 1991

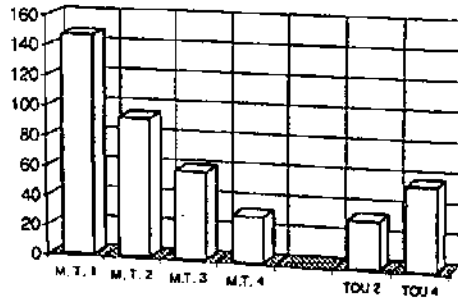
En 1991, nous avons choisi de mesurer la croissance des sphaignes par l'implantation d'individus isolés dans les coussinets de sphaignes. Nous avons soigneusement glissé les plantes coupées et marquées dans la masse de sphaignes au moyen de brucelles jusqu'à l'intégration des capitulum au niveau des individus en place. Cette méthode visait une assimilation optimale des individus implantés sans altération ou modification importante de l'architecture des coussinets de sphaignes.

Malheureusement les individus marqués, placés à fin mai, ont accusé une différence de vitesse de croissance trop importante au début de la saison et ont été dominés par les individus en place. Pour la série des gazons de mousses, les sphaignes placées dans le feutrage de *Polytrichum strictum* ont présenté une croissance en longueur nulle. Nous les avons toutes retrouvées, sèches et cassantes, empêchant toute mesure. Si la compétitivité forte pouvait être prévisible pour la série des marais tremblants, vu la forte croissance observée dans les fosses, les résultats totalement négatifs de la série des touradons indiquent que la croissance sous et dans les tiges feuillées d'*Eriophorum vaginatum* est assez importante au cours d'un été pour entrer en compétition avec des individus externes. Les rares mesures obtenues (2) pour cette série nous font supposer un allongement de 33 mm dans la cavité du touradon (stade 2) et de 9 mm dans la butte du stade 4 (3 mesures). Pour la série des gazons de mousses, seul le stade 4, avec la jeune butte à sphaignes a permis de récupérer 5 individus qui montrent un allongement moyen de 33 mm. Pour la série des marais tremblants, l'allongement estimé pour le stade 2 est de 85 mm (2 mesures). Il apparaît insignifiant pour la butte du stade 4 sur la base de 3 plantes retrouvées.

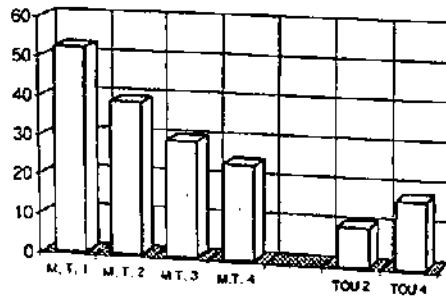
Tableau 34: Résultats des mesures de croissance

M. tremb.1	M. tremb.2	M. tremb.3	M. tremb.4	Tour 2	Tour 4
Accroissement moyen en longueur (mm) par plante					
147	93	59	31	32	56
Accroissement moyen en poids (mg) par plante					
52.3	38.9	29.5	24.1	9.9	17.0
Accroissement moyen en poids (mg par mg/cm de tige)					
12.1	5.9	3.1	2.7	1.6	2.8

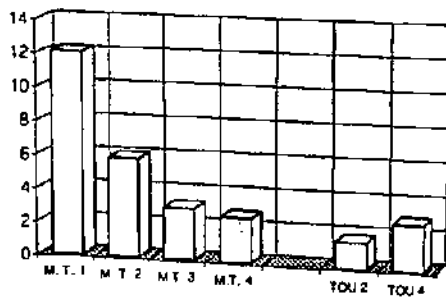
Les valeurs expriment la moyenne des individus récoltés avec trois répétitions par stade



Accroissement en longueur (mm)



Accroissement en poids (mg)



Accroissement en poids en mg par cm de tige

Figure 89: Productivité de *Spagnum angustifolium* dans différentes stations *in situ* en 1992

Ces résultats ne justifient aucun commentaire.

7.2.2. Les mesures de croissance de 1992

Comme nous l'avons indiqué dans la partie méthodologique (chap. 1.6.), nous avons adapté la technique d'implantation pour la saison 1992 tout en conservant la méthode précise de la correction de poids du capitulum (CLYMO, 1970).

Seule la série des marais tremblants a permis une installation complète avec trois répétitions de mesures pour les 4 stades. Vu la structure particulière des stades à touradons, nous n'avons pu tester que le deuxième stade, en bordure des touradons, en respectant au mieux la protection des cavités et le quatrième stade, grâce au tapis sphagnal continu. Nous avons volontairement écarté la série des gazons de mousses à cause du mode naturel d'implantation des sphaignes en petites taches et la présence importante des vaccinées au stade 4. Ces dernières jouent un rôle protecteur de premier plan mais il est très difficile de les intégrer à la mise en place de rondelles de sphaignes pures en reconstituant une structure fidèle. Pour la série des touradons, nous avons également placé des rondelles à même la tourbe nue, sans protection, afin de tester l'implantation de sphaignes sur de tels supports.

Les résultats chiffrés, présentés au tableau 34, montrent l'accroissement en longueur ainsi qu'en poids. Nous avons également calculé l'augmentation de poids par unité de longueur (cm de tige). La figure 89 permet de visualiser graphiquement l'évolution d'un stade à l'autre pour les deux séries.

La comparaison brute des deux séries permet de constater sans surprise que les sphaignes de la série des marais tremblants ont une croissance annuelle nettement plus grande que les sphaignes de la série des touradons. En tenant compte uniquement des stades identiques (2 et 4), les résultats deviennent réellement comparatif. Le tableau 35 fournit ces données:

Tableau 35: Croissance de *Sphagnum angustifolium*. Comparaison des stades 2 et 4 des séries des marais tremblants et des touradons

		marais tremblant			touradon		
		stade 2	stade 4	moy	stade 2	stade 4	moy
Acc. longueur (mm)	max	142	60		50	74	
	min	69	1		1	30	
	moyenne	93	31	62	32	56	44
Acc. poids (mg)	max	77.3	49.5		19.6	31.8	
	min	3.8	1.9		2.7	8.5	
	moyenne	38.9	24.1	31.4	9.9	17.1	13.6
Acc. poids/cm (mg)	max	10.5	5.0		5.0	4.7	
	min	1.0	0.2		0.3	0.9	
	moyenne	5.9	2.7	4.3	1.6	2.8	2.2

Productivité: Intégration des sphaignes en cours de saison

Implantation des sphaignes en rondelles au début de saison (mai)



Les sphaignes marquées sont intégrées au radeau flottant en fin de saison (septembre)



Pour la série des marais tremblants, la dynamique de la croissance au cours de l'évolution de la régénération est nettement dégressive. Les résultats des tableaux et figures montrent clairement la relation entre la croissance et le niveau hydrique, avec une exceptionnelle croissance en longueur pour les stades 1 et 2. L'augmentation en poids est également en constante diminution d'un stade à l'autre. En ramenant l'accroissement en poids à l'unité de longueur de tige produite, le premier stade montre la plus forte augmentation alors que les stades 3 et 4 sont assez proches l'un de l'autre. Exprimée en valeur relative, la croissance du stade 4 est 77,7% plus faible que celle du premier stade alors qu'avec le stade 2, la proportion est de 54,2%. La relation croissance-degré d'humidité des plantes a été étudiée par SILVOLA & AALTONEN (1984). Ces auteurs ont constaté lors d'études expérimentales que les espèces testées présentent un optimum d'humidité pour une photosynthèse maximale. Une faible diminution du degré d'humidité provoque une rapide baisse dans la photosynthèse mesurée alors qu'un excédent d'eau diminue peu cette même photosynthèse. WALLEN *et al.* (1988) montrent la relation directe entre la croissance et l'élévation du tapis de sphaignes au-dessus du niveau moyen de la nappe phréatique. Enfin LUETT (1992) a également mesuré la croissance *in situ* en détaillant les microhabitats et en comparant diverses espèces par saison. Ses résultats indiquent clairement que *Sphagnum angustifolium* présente une productivité maximale dans les dépressions humides et minimale lorsqu'elle se développe en petite butte. La diminution de croissance de *Sphagnum angustifolium* que nous avons mesurée dans les différentes fosses de Bellelay est parfaitement corrélée à ces résultats, vu le gradient hydrique et l'évolution de la structure du milieu.

Il y a donc bel et bien **une forte croissance verticale lors des phases initiales de la régénération en milieu aqueux**. Le comblement des fosses est toutefois pondéré par le fait que le tapis de sphaignes se couche complètement chaque automne sous l'effet du poids trop important du tapis sphagnal puis de la neige. La croissance est donc ici à la fois verticale et horizontale, avec des alternances. Ce phénomène a parfaitement été mis en évidence par OVERBECK & HAPPACH (1957) qui ont mesuré un allongement horizontal annuel de 7 à 33 cm par année pour *Sphagnum angustifolium*.

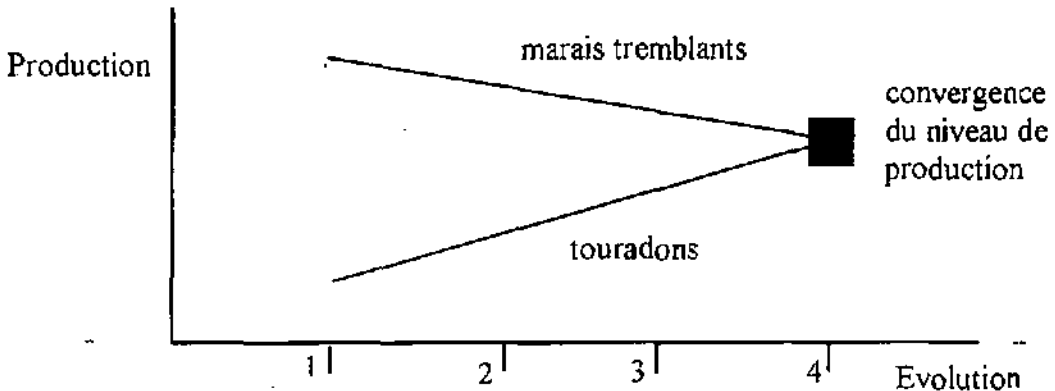
Pour la série des touradons, la dynamique de croissance est inversée entre les stades pionniers et évolués. Le stade 2 présente un allongement faible, relativement similaire à celui du stade 4 des marais tremblants. Le stade 4 par contre a un accroissement en longueur plus important que son homologue des fosses de Bellelay. Considéré en poids, l'augmentation est faible pour les deux stades, dont les valeurs moyennes ne dépassent pas celles atteintes dans les marais tremblants. Placés en conditions pionnières défavorables, *Sphagnum angustifolium* réagit comme une espèce de butte, avec un resserrement du tapis, des capitulum plus petits mais une plus forte densité spatiale. La croissance est ralentie.

Pour les stades les plus évolués des deux séries, il y a inversion des stratégies de croissance. En milieu terrestre, la photosynthèse est plus faible qu'en milieu aqueux. Elle ne permet pas de métaboliser autant, si bien que le poids augmente dans une proportion moindre. Par contre l'allongement est plus important, indiquant un étiolement des sphaignes. Ces deux stratégies de croissance permettent une comparaison intéressante des deux séries. Nous avons montré, par l'analogie des courbes de dépassement permanent de la nappe, que le **fonctionnement hydrodynamique saisonnier présente une uniformisation pour ces stades**. Nous avons indiqué une absence de nappe libre pour la série des marais tremblants, mais une forte humidité facilitée par les remontées capillaires depuis le réservoir hydrique de profondeur. Pour la série des touradons, le quatrième stade a un sol très mince avec une imperméabilisation de la tourbe qui permet la création d'une nappe temporaire et un réservoir pour garantir les remontées capillaires. Malgré cette apparente uniformité, la réserve d'eau est permanente dans la fosse de Bellelay, ce qui diminue fortement la sécheresse estivale des sphaignes vivantes. A La Chaux-d'Abel, la présence temporaire de la

nappe est défavorable et provoque des périodes plus sèches en surface. Selon les travaux de SILVOLA & AALTONEN (1984), la photosynthèse est rapidement et fortement ralentie lors de l'assèchement du tapis sphagnal, ce qui diminue notablement la prise de poids des sphaignes. Nous supposons que l'étiollement est une réaction au stress hydrique et aux fluctuations thermiques qui l'accompagnent.

Ramené à l'unité de longueur, la croissance entre les deux stades est exactement identique avec 2.7 et 2.8 mg/cm de tige pour la saison (moyenne des trois répétitions). **Il y a donc bien une différence de stratégie liée au métabolisme mais une très grande uniformisation de la productivité globale pour les stades les plus évolués.**

Figure 90: Schéma explicatif de la convergence de la croissance entre les deux séries analysées



7.3. DISCUSSION ET CONCLUSION

Ces résultats indiquent **une très bonne adaptation des sphaignes du groupe *recurvum* aux différents micromilieus dans lesquels elles assurent la recolonisation initiale.** Elles sont parfaitement intégrées aux conditions écologiques locales et aux variabilités entre les stades et les milieux. L'architecture des coussinets est passablement différente d'un stade à l'autre et d'une série à l'autre, ce qui indique bien que les sphaignes peuvent répondre aux conditions imposées par le milieu et **très rapidement modifier les conditions locales pour assurer une croissance la meilleure possible.** Les caractéristiques de croissance sont, pour ces phases pionnières, intimement liées aux conditions propres du milieu (évolution saisonnière, périodicité et intensité des dessiccations) **si bien qu'il semble opportun de considérer ces plages de sphaignes comme formant autant d'écotypes.** La convergence de croissance illustrée sur la figure 90 montre un effet de "feedback" positif pour la série des touradons alors qu'il est négatif pour la série des marais tremblants.

Nous ne discuterons pas ici des chiffres mesurés pour l'accroissement de longueur et de poids. Les valeurs obtenues sont parfaitement incluses dans la fourchette fournie par LINDHOLM & VASANDER (1990) dans leur synthèse littéraire et très proche des résultats récents de LUETT (1992). Nous constatons à la lecture de leurs tableaux qu'il y a une énorme variabilité pour chaque espèce. Non seulement cette variabilité est majeure entre les régions prises en considération, mais également sur un même site en fonction des conditions écologiques locales. L'amplitude des valeurs mesurées dans les fosses de Bellelay en fonction des changements de la nature du sol "représente" à elle seule la variabilité totale des mesures de références rassemblées par ces auteurs pour le groupe *recurvum s. l.*

Selon les travaux de LUETT (1992), la croissance est nettement différente d'une saison à l'autre. Elle a divisé l'année en trois périodes: le printemps (du 1^{er} avril au 30 juin), l'été (du 1^{er} juillet au

30 septembre) et la mauvaise saison (du 1^{er} octobre au 30 mars). La croissance est nettement plus importante en été mais elle n'est pas nulle durant la mauvaise saison. Ce fait impose la plus grande prudence dans la comparaison des résultats entre auteurs, surtout lorsque l'on souhaite comparer des croissances annuelles. Bien souvent, comme c'est le cas pour cette étude, les recherches concernent l'été et tout ou partie du printemps. Les valeurs obtenues sont donc sous-estimées pour l'expression de la productivité annuelle.

L'analyse des résultats indique un fonctionnement temporel de la croissance très intéressant. Placées en conditions d'excès hydrique, comme dans une fosse inondée, les sphaignes ont besoin d'un support physique stable proche de la surface pour se maintenir. Dès que ces conditions physiques sont trouvées, le potentiel de croissance est exprimé au maximum. Il y a une rapide modification des conditions du milieu avec le comblement de la fosse et l'élévation du tapis de sphaignes. Par leur forte productivité initiale et les modifications des conditions écologiques qu'elles provoquent, les sphaignes s'imposent une rapide limitation de croissance. Nos quatre stades montrent parfaitement l'adaptation des plantes aux divers milieux et le ralentissement de la croissance qui en résulte. Nous pouvons dire que, dans les fosses, le facteur temps est défavorable à la croissance.

Pour les séries terrestres par contre, les sphaignes doivent compenser les conditions initiales défavorables du milieu. Les rondelles placées sur la tourbe nue sans protection attestent cette nécessité. Nous avons observé un effondrement du coussinet dans la rondelle de PVC et un arrêt de croissance. La stratégie est donc inversée. Les individus qui parviennent à s'implanter dans les micromilieus les plus favorables ont une faible productivité initiale. Cependant, le temps leur est favorable car il permet de légères améliorations d'année en année et une augmentation de la productivité. Dans ce cas, le milieu devient de plus en plus favorable à la croissance des sphaignes, et ceci par les changements induits par les tapis de sphaignes eux-mêmes.

Comme pour toute colonisation, l'installation des espèces pionnières fait place à un milieu plus stable, dans lequel l'évolution est ralentie et la productivité plus basse. La compétitivité permet l'apparition d'espèces dont l'optimum écologique est adapté aux conditions préparées et/ou induites par les espèces colonisatrices. Pour nos séries, les stades finaux illustrent parfaitement cette phase. Dans chaque cas, il y a apparition de *Sphagnum magellanicum* et formation de jeunes buttes à sphaignes.

La morale de cette colonisation pourrait être celle de la fable du lièvre et de la tortue, sauf que pour les sphaignes et le succès de la régénération, lièvre et tortue finissent ensemble, à la même vitesse et passent le témoin au *Sphagnion magellanicum*.

Dès lors, vouloir implanter par pieds isolés des individus du même groupe spécifique mais provenant d'un haut-marais unique et stable apparaît aujourd'hui comme une gageure. Vu les résultats de 1992, l'adaptabilité des sphaignes était possible, mais uniquement grâce à l'effet de groupe et surtout au maintien de l'architecture propre à l'écotype grâce à la rondelle qui a empêché une concurrence trop importante. Les résultats chiffrés indiquent donc la réaction de croissance d'un écotype unique, en fonction de son adaptation aux conditions imposées par le milieu, mais sans concurrence interspécifique. Nombres d'auteurs ont déjà discuté l'adaptabilité des espèces de sphaignes, en particulier quant à la dessiccation (TOUFFET 1969, JOHANSSON & LINDER 1980, HAYWARD & CLYMO 1983, WAGNER & TITUS 1984, RYDIN 1985). Les résultats positifs de 1992 sont avant tout dus au fait de l'utilisation d'une espèce de replat, à l'adaptabilité très grande et rapide. Sa présence comme pionnière naturelle confirme du reste parfaitement son large spectre de conditions vitales.

8. SYNTHÈSE DES RESULTATS

INTRODUCTION

Notre travail est basé sur un inventaire typologique des stations en régénération à travers l'Arc jurassien. Les résultats typologiques montrent que le phénomène de la régénération en milieu ouvert est rare (25% des surfaces potentielles réellement concernées). De plus, là où elle se met en place, la régénération suit des vitesses relativement différentes en fonction des conditions propres à chaque situation particulière. Dès lors, le recensement et l'analyse comparée de la panoplie des types d'expression a permis de montrer que le phénomène ne se fait pas au hasard, mais semble suivre un certain nombre de voies évolutives convergentes. Ce fait est autant valable pour les milieux terrestres (qui offrent de multiples supports solides pour la recolonisation végétale) que pour les fosses de tourbage, où la recolonisation végétale est parfaitement assimilable au phénomène bien connu d'atterrissement des plans d'eau. Cette observation indique clairement qu'après les interventions humaines, les voies évolutives sont finalement les mêmes que pour les conditions primaires:

- a) "Atterrissement" pour les systèmes aquatiques liés aux fosses de tourbage
- b) "Paludification" pour les systèmes terrestres par analogie aux définitions de FRANCEZ (1990)

Dans le cadre des fosses de tourbage, les observations liées aux recherches typologiques mettent en évidence que la régénération est assimilable à une réaction de la tourbière pour recommencer *de novo* le processus complet de sa formation, du bas-marais au haut-marais, la dynamique étant nettement accélérée par l'entourage général protecteur et favorable (masse de tourbe en place, mésoclimat, qualité hydrique). Pour les systèmes terrestres, la réaction du haut-marais "s'exprime" par la reconstitution d'une structure diplotelmique et la mise en place d'une nouvelle acrotelme fonctionnellement assimilable à celle d'origine. Là, la diversité des voies est imposée par les conditions microtopographiques, micrométéorologiques et l'état de dégradation de la tourbe de surface. La régénération conduit à une nette convergence des structures végétales vers la formation du *Sphagnion magellanici* et à une augmentation de la complexité du milieu.

Ces observations nous ont orientés sur l'hypothèse d'un fonctionnement des phases initiales de la régénération répondant au concept écologique des **successions végétales**. Chaque série décrite illustre une succession qui a ainsi été prise en compte grâce à l'illustration de quatre phases similaires de l'évolution (analogue aux chronoséquences des hydrosères pour la série des marais tremblants et à des chronoséquences pour les deux séries terrestres).

Cette synthèse vise trois buts distincts:

- 1° Discuter et critiquer la notion de succession pour nos trois séries en regard des résultats accumulés pour chaque stades.
- 2° Mettre en évidence le complexe optimal des conditions écologiques qui permet d'assurer la réussite de la régénération en milieu secondaire ouvert.
- 3° Discuter la nature et le degré des interventions humaines possibles et souhaitables pour garantir la mise en place ou le maintien du complexe de conditions écologiques afin que les gestionnaires des milieux tourbeux puissent initier, maintenir et/ou accélérer la régénération.

8.1. LA NOTION DE SUCCESSION ADAPTEE AUX SERIES EVOLUTIVES DECRITES

8.1.1. Définitions et généralités

La notion de succession végétale a fait l'objet de très nombreux travaux et initié plusieurs "écoles" depuis le début du siècle. Outre la mise en place de nombreuses théories générales ou spécifiques, beaucoup d'auteurs ont essayé de formuler des modèles afin de permettre le calibrage des observations et des études sur des concepts intégrateurs. LEPART & ESCARRE (1983) ont rassemblé la majorité des courants décrivant les mécanismes ou les modèles dans une analyse bibliographique très complète et fouillée. Pour les hauts-marais, de nombreux travaux ont fait appel à la notion de succession, principalement pour mettre en place l'histoire végétale de la formation des tourbières, en particulier et très succinctement nous citerons ceux de TANSLEY (1939), WALKER (1970), ROYER *et al.* (1978), SJOERS (1979), GORE (1983), TALLIS (1983), etc. Pour les milieux secondaires, FRANCEZ (1990) et LUETT (1992) ont discuté la notion de succession en relation avec la régénération des hauts-marais, mais dans des conditions relativement différentes de nos préoccupations.

En 1916, CLEMENTS élabore son mécanisme successional basé sur la notion du *fonctionnement organismique* aboutissant à un climax végétal unique. Du sol nu à la phytocénose climacique, les plantes (individus ou communautés) modifient successivement le milieu en créant des conditions favorables à d'autres individus ou communautés jusqu'à ce que les modifications soient plus favorables aux espèces en place qu'aux nouvelles. CLEMENTS différencie les successions primaires et secondaires.

Dans notre cas, l'approche secondaire permet de caractériser l'évolution végétale. Une communauté en place est totalement modifiée par l'action de l'homme ou de la nature. Le sol est dénudé et un cycle évolutif nouveau est initié. Les premières recherches sur les successions secondaires ont porté sur les effets de l'abandon des pratiques agricoles, sur les coupes rases, les brûlis, les ouragans, etc.

Pour la recolonisation végétale des terrains abandonnés suite à l'exploitation des tourbières, nous considérons que l'action humaine peut provoquer un impact qui induit une évolution secondaire mais que celle-ci répond plus nettement à la définition de la succession primaire. Pour le haut-marais, le sol mis à nu, bien qu'essentiellement organique, est assimilable à une roche nue, une dune de sable et bien sûr à un lac dans le cas des fosses de tourbage. CLYMO & DUCKETT (1986) tout comme GROSVERNIER (1996) montrent clairement que la tourbe perd totalement son pouvoir germinateur et qu'il faut des apports externes (spores, graines, rameaux, feuilles) pour assurer la recolonisation par la végétation herbacée et sphagnale (POSCHLOD & PFADENHAUER 1989, POSCHLOD 1989). Les sols tourbeux réagissent donc bien comme un support inerte dépourvu d'une banque graminéale ou sporale, contrairement à la majorité des successions secondaires étudiées. Nous sommes donc ici en opposition avec le modèle de la *composition floristique de base* (valable pour les atteintes humaines précitées ou les ouragans) défendu par EGLER (1954) en réaction au mécanisme de CLEMENTS.

L'approche des successions peut se faire par des recherches **dinchroniques** ou **synchroniques**. Les recherches diachroniques se font en temps réel, par un suivi d'observations directes sur de longues périodes temporelles afin de décrire le phénomène dans sa **continuité**. L'approche

synchronique est la plus utilisée car nombre de phénomènes successionnels sont trop lents pour assurer une observation continue. Dès lors, le chercheur sélectionne des stades illustratifs du phénomène complet et les étudie en parallèle, de manière indirecte, sur un laps de temps court. L'approche de nos séries est intégralement calquée sur cette démarche synchronique. Pour garantir une bonne viabilité des résultats, des conditions strictes doivent être remplies au départ (LEPART & ESCARRE, 1983). Il faut:

- Une relative uniformité du climat, du substrat et de l'environnement de toutes les stations étudiées
- Un même degré et une même nature des perturbations ayant affecté les milieux initiaux.
- La cessation des activités humaines après la perturbation.
- L'évolution d'une série aux perturbations plus récentes doit être prise en compte en parallèle.

Pour les hauts-marais jurassiens, les trois premières conditions sont assez facilement remplies. L'environnement général est partout le même, ainsi que la nature du sol. L'uniformité des atteintes humaines est remarquable quant à la nature des travaux menés, tout comme l'abandon total de l'influence humaine et son synchronisme. L'aspect le plus difficile à contrôler réside dans la relation entre l'état végétal initial, l'impact humain et la réponse du milieu. En effet, l'exploitation de la tourbe a été pratiquée durant la Seconde Guerre Mondiale selon des méthodes similaires. Cependant, si la structure des terrains à l'abandon des exploitations était la même (surface uniforme de tourbe nue plus ou moins plate), la végétation primaire détruite et, partant, les conditions écologiques des milieux, n'ont pas toujours été identiques.

Pour la série des marais tremblants, ce problème n'existe pas vu la proximité des fosses dans le marais de Bellelay. Pour la série des gazons de mousses, toute la succession se déroule en bordure des murs d'exploitation. Vu la position et la hauteur des murs dans les tourbières, les conditions écologiques primaires devaient être les mêmes. Par contre, pour la série des touradons, les observations faites lors de la typologie et le choix de nos stades pose le problème de l'uniformité des conditions écologiques primaires. En effet, le site des Pontins, stade 1, est localisé au coeur du massif de tourbe, sur une tourbe épaisse mais érodée. Sa végétation potentielle primaire est celle du *Sphagnetum magellanici* ou du *Pino mugo-Sphagnetum*. Pour les stades 2 à 4 par contre, le site de La Chaux-d'Abel est situé en bordure du haut-marais. L'épaisseur de tourbe est naturellement faible et la végétation primaire potentielle celle du *Sphagno-Piceetum* ou même du *Caricion nigrae*.

Dans quelle mesure l'unité spatio-temporelle est-elle garantie?

Nous considérons que pour les hauts-marais, ce problème est relativement peu important quant aux conditions permettant et orientant la régénération. Comme pour une dune de sable ou un champ de lave, l'influence de l'épaisseur du matériau ou des conditions écologiques primaires est totalement inhibée par les caractéristiques de la surface du nouveau "sol". C'est à ce niveau uniquement que se jouent la sélection et la compétition pour la germination. De plus, pour la tourbière, même en conditions primaires, les relations sol-végétation se règlent sur les 30 à 40 premiers centimètres de surface. L'unité spatiale quant au potentiel fonctionnel est donc respectée.

Quant à la quatrième condition, elle n'est pas remplie totalement en terme d'études détaillées. Les atteintes les plus récentes sont trop jeunes pour garantir une quelconque observation de l'évolution végétale car toutes les tourbes sont encore dénudées.

Nous sommes parfaitement conscients que ce manque de comparaison est problématique pour l'extrapolation des conditions initiant la régénération car les pratiques d'exploitation et la nature exacte des atteintes n'est pas équivalente aujourd'hui à ce qu'elle était en 1940. Outre les moyens mécaniques mis en oeuvre, l'efficacité plus grande et plus générale du drainage, les volumes de tourbe éliminés et la qualité des précipitations sont fort différents et peuvent fortement influencer les conditions au niveau des nappes et des sols. Il ne faudra dès lors pas oublier que **le phénomène décrit aujourd'hui et initié il y a 40 ans, en relation étroite avec les conditions de l'époque, n'est pas obligatoirement reproductible tel quel, face à des exploitations récentes.**

Malgré les nombreuses critiques formulées à l'encontre du modèle de CLEMENTS (cf. la liste et les justifications dans LEPART & ESCARRE, 1983), MARGALEF (1968, 1974, 1979) et ODUM (1969, 1971) ont repris le concept de base en proposant une définition nouvelle de la succession. Pour eux, et nous citons ici le passage de LEPART & ESCARRE, *"la succession est considérée comme le processus d'auto-organisation résultant des interactions entre les organismes eux-mêmes et avec le milieu physique, celui-ci intervenant principalement pour déterminer la vitesse et le développement de la succession... L'écosystème subit un processus ordonné de développement raisonnablement directionnel qui conduit à un état stable avec un maximum de biomasse"*. Présenté en d'autres termes, la succession est un processus dans lequel l'accumulation d'information confère à l'écosystème un affranchissement croissant à l'égard des fluctuations de l'environnement.

La notion de compétition entre les plantes et les interactions entre plantes et milieux ont conduit ODUM (1969) à formuler une série de 24 paramètres caractéristiques des écosystèmes, en exprimant leur évolution le long d'une succession. Malgré les critiques formulées face à la généralisation de ce modèle, nous testerons les trois séries décrites pour chacun des 24 paramètres afin d'évaluer les caractéristiques évolutives de ces séries. Pour BARBAULT *et al.* (1980, 1981), les étapes de la succession végétale peuvent être comparées à partir de la composition structurale et du fonctionnement des peuplements. Pour eux, cette approche complète celle plus classique des circuits de matière et d'énergie. En fonction de nos propres résultats, les discussions sur les séries feront passablement appel à la notion structurale et fonctionnelle de ces milieux.

Pour compléter ces généralités, nous citerons encore la synthèse du mécanisme de la succession proposée par CONNELL & SLATYER (1977). Ils proposent trois modèles orientés sur le rôle de la compétition dans les changements de composition spécifique.

1° Modèle de "facilitation"

Les espèces transitoires ne peuvent s'établir qu'une fois le milieu suffisamment modifié par les espèces pionnières. Il y a analogie forte avec le modèle de CLEMENTS (1916).

2° Modèle de "tolérance"

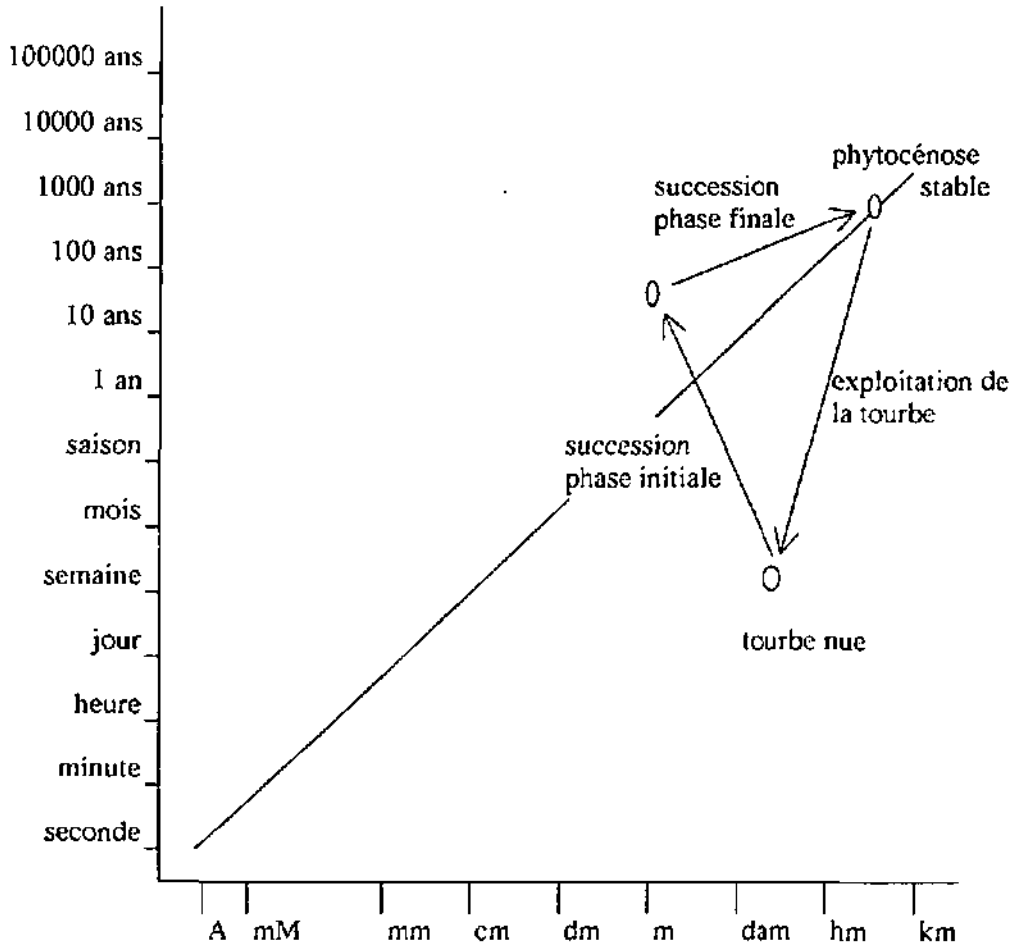
Les espèces transitoires s'installent sur le milieu indépendamment de l'influence des espèces pionnières. Elles peuvent s'installer parce qu'elles sont plus efficaces pour l'exploitation des ressources.

3° Modèle "d'inhibition"

Les espèces pionnières empêchent l'installation des autres espèces. Ce sont des contraintes externes ou leur sénescence qui permet le changement spécifique.

Figure 91

**Relations spatio-temporelles induites
par l'exploitation de la tourbe et la régénération**
(d'après GOBAT, non publié)



Ce mécanisme, basé sur les modalités de compétitivité, exprime de manière globale l'opposition de DRURY & NYSBET (1973) au concept d'ODUM. Pour ces auteurs, la succession se résume à la notion de compétition exprimée par les différences de croissance, le pouvoir de dissémination (cf. également MILES, 1987) et la capacité de survie. GRIME (1987) rejoint ces conceptions sur la compétition par le principe d'espèces dominantes et d'espèces subordonnées, en incluant la notion de tolérance spécifique au "stress" du milieu. Enfin, WHITE (1979) a donné une bonne définition du mécanisme de succession autogénique en faisant intervenir les réactions des espèces sur le milieu et la notion de compétition. Nous empruntons encore à LEPART & ESCARRE (1983) cette définition.

"Tout changement de la végétation d'une communauté occasionné par les propriétés des espèces présentes et leurs effets sur les caractéristiques du milieu (changements édaphiques inclus). La présence des espèces sur la station modifie les caractéristiques du milieu de telle sorte que celles-ci deviennent plus favorables à d'autres végétaux qui vont s'installer puis, par compétition, éliminer les premiers". Le processus est cyclique d'une modification à une autre.

8.1.2. L'approche successione liée à la régénération des hauts-marais jurassiens

8.1.2.1. Introduction

Discuter l'approche descriptive et analytique des trois séries évolutives que nous avons traitées sous l'angle des principes théoriques globaux des successions végétales nécessite quelques précisions et mises en garde. Qu'elle soit diachronique ou, comme ici, synchronique, l'étude des successions fait appel classiquement à une échelle évolutive importante, analysant aussi bien les milieux les plus pionniers, des phases intermédiaires et les communautés climaciques. Des changements notables peuvent ainsi être mis en évidence aussi bien pour les phytocénoses que pour la faune voire même parfois au niveau des sols. Plus les différences entre stades pionniers et stades mûrs sont grandes, plus net apparaît l'évolution des fonctionnements écologiques utilisés pour justifier ou décrire la succession.

Dans notre étude, les trois séries secondaires couvrent une évolution végétale très courte et ne concernent que les premières phases des évolutions mises en place dans le cadre général de la régénération complète des hauts-marais. C'est volontairement que nous nous sommes ici limités aux milieux ouverts et aux phases initiales de cette dynamique secondaire, en faisant abstraction du rôle des chaméphytes et des arbres dans les phases ultérieures de l'évolution de ces marais. En empruntant au cours d'écologie du professeur J.-M. GOBAT (Université de Neuchâtel) une figure illustrative des relations spatio-temporelles au sein des écosystèmes, nous avons essayé de préciser les modifications spatio-temporelles subies par les phytocénoses touchées par les exploitations de tourbe. (figure 91).

Ainsi, si le haut-marais naturel fonctionne en équilibre "instable" sur une échelle espace-temps très grande, l'exploitation de la tourbe provoque instantanément la création de milieux perturbés évoluant sur des surfaces plus restreintes et surtout, selon des rythmes nettement plus courts, directement liés aux conditions externes (climatiques en particulier). La cicatrisation végétale qui se met en place concerne initialement des portions minimales de ces milieux perturbés en relation avec l'hétérogénéité du milieu et l'autoécologie des espèces pionnières. Ainsi, les premières phases des successions secondaires permettent à de petites surfaces de retrouver une stabilisation fonctionnelle, donc une élévation sur l'échelle temporelle qui exprime bien l'affranchissement croissant de la couverture végétale face aux contraintes externes.

Nous considérons que pour nos trois séries, la convergence exprimée par la complémentarité des stades finaux correspond à la fin des phases initiales des successions et à l'intégration des milieux dans la dynamique "naturelle" des haut-marais, décrites par MATTHEY, W. (1965) et ROYER *et al.* (1978).

Dès lors il est relativement difficile de calquer l'évolution de séries sur le mécanisme de ODUM (1969), sur la base de son modèle tabulaire. Nous l'avons néanmoins tenté en étant bien conscient que nombre de questions sont tranchées sur des suppositions et en ne pouvant utiliser que l'évolution des sphaignes et leurs relations avec diverses espèces pionnières.

8.1.2.2. Validation de la notion de succession sur la base du modèle de ODUM (1969)

Le tableau 36 rassemble de manière synoptique à la fois les 24 points à tester selon ODUM, ses prévisions évolutives pour chacun entre les stades pionniers et mûrs, ainsi que la validation que nous pouvons en tirer pour les trois séries décrites.

Pour les caractéristiques de l'écosystème, beaucoup de points ne peuvent pas être confirmés ou infirmés car nous n'avons pas étudié de manière chiffrée les paramètres nécessaires. Bien que ne faisant appel qu'à des impressions et à des résultats souvent limités aux sphaignes, nous considérons que le rapport "production brute/biomasse en place" ainsi que la production nette n'évolue pas de manière identique entre les séries terrestres et aquatiques. Pour les deux successions terrestres, l'expression de la production basée sur les sphaignes indique une augmentation de la productivité entre les stades pionniers et évolués. A l'inverse, pour la **série des marais tremblants**, il y a une nette diminution de la productivité (des sphaignes mais également des herbacées). Cette succession **confirme** l'hypothèse de ODUM alors que pour les deux séries évolutives terrestres, la question reste ouverte. Si l'on suppose que la biomasse en place reste relativement constante, l'augmentation de la productivité provoque au mieux la stabilité du rapport, voire son élévation, ce qui est contraire à la **prédiction de ODUM**.

Pour la section liée à la structure de la communauté, l'évolution des trois successions **confirme** les hypothèses formulées par ODUM. Vu la nature même du matériel étudié l'apport en matière organique n'a pas réellement de signification. Néanmoins, si l'on ne tient compte que des structures vivantes, il y a une augmentation de la matière organique jeune, qui vient se superposer à la tourbe en place, fonctionnant comme une roche nue. La diversité spécifique est également une notion à relativiser fortement dans le cadre général des hauts-marais, vu la forte pauvreté "naturelle" de ces milieux. Une élévation de la diversité spécifique est néanmoins notable pour chacune des séries, avec une augmentation de 2 espèces à 9 du stade 1 au stade 4 pour la série des touradons, et respectivement 3 à 10 pour les gazons muscinaux et 5 à 12 pour les marais tremblants. Ces chiffres mettent de plus en évidence que la dureté des atteintes subies par la végétation permet une meilleure diversité spécifique dans les fosses (conditions écologiques plus stables). L'équitabilité est également nettement meilleure pour les stades évolués, avec une relativement bonne répartition spatiale des espèces par rapport aux premiers stades, fortement dominés par une ou deux espèces.

Pour les caractéristiques biologiques, nous constatons une **confirmation générale de l'hypothèse** de ODUM par un rétrécissement de l'habitat des espèces par le fait qu'initialement, l'habitat potentiel concerne l'entier de la surface. Dès la colonisation par des espèces pionnières, qui profitent au maximum de la surface vierge, il y a focalisation des habitats par la structuration de l'écosystème et l'initiation de micromilieux aux fonctionnalités différentes. Si l'on tient compte des sphaignes,

l'évolution provoque une spécialisation des habitats et une différenciation spécifique entre replat et butte, les autres espèces se localisant en parallèle en fonction de leur préférendum écologique dans les niches les mieux adaptées. Pour la notion liée à l'évolution de la taille de l'organisme, il faut nuancer selon la définition donnée à l'organisme. Si l'on traite ce terme par analogie à l'individu, l'augmentation de taille n'est pas flagrante pour toutes les espèces. Par contre, si organisme est associé avec population, au sens du nombre et de la structure, l'augmentation de taille est bien réelle. Pour les sphaignes, principales colonisatrices de ces surfaces, il y a passage progressif d'individus isolés à des petits coussinets puis à de véritables tapis. Vu le mode de croissance, cette augmentation nette de la population est directement assimilable à une croissance de l'organisme "individu" puisque celui-ci non seulement présente un allongement continu et une division latérale multiple et infinie.

Pour le thème liés aux cycles des éléments nutritifs, nous manquons de données précises pour trancher avec sûreté. L'augmentation du rôle des détritiques dans la régénération des éléments nutritifs apparaît comme nettement confirmé dans les trois successions analysées. Pour les séries terrestres, ces détritiques ne sont ni plus ni moins que la preuve de la néoformation de tourbe. De plus, nous avons montré au chapitre 4.2. l'importance des sphaignes pour le stockage du calcium p. ex. De manière générale, ce rôle présente un caractère important en tourbière puisque les détritiques participent fortement à marquer le caractère acide et hostile de ces milieux, même si c'est pour limiter encore plus la vitesse de régénération et d'utilisation des éléments nutritifs.

Pour la pression de sélection, nous confirmons également les modifications de stratégies de croissance et de production proposée par ODUM. En phase initiale, il y a une stratégie rapide de type "r", avec la sporulation de *Polytrichum alpestre*, la forte production de graines d'*Eriophorum vaginatum* ou encore la rapide colonisation du plan d'eau par racines et rhizomes. Très rapidement cependant, nous considérons que cette stratégie fait place à une production liée à la qualité, avec de nombreuses relations rétroactives par dominance et subordination entre les espèces.

L'homéostasie générale évolue elle aussi dans le sens des hypothèses de ODUM. Comme déjà signalé ci-dessus, il y a une diminution de la lixiviation à travers les profils dès l'apparition des sphaignes (pour le calcium p.ex.). De même, il y a une nette diminution des influences externes sur l'équilibre fonctionnel, dès que la couverture des sphaignes est suffisante pour assurer une régulation microclimatique et hydrique sur le milieu. L'expression du *Sphagnion mogellanici*, milieu qualifié de stable, reflète bien cet affranchissement. La diminution de l'entropie est directement liée aux rôles des sphaignes, tout comme l'augmentation de la notion d'information. Il y a une réelle organisation et structuration du milieu entre les surfaces dénudées et les complexes de buttes et replats à sphaignes.

8.1.3. Discussion et conclusion

MILES (1979, 1987) signale qu'il faut porter une attention particulière aux problèmes d'échelles de perception lors de l'approche des successions (c.f. également GUINOCHET (1955) qui indique que c'est l'échelle de perception qui crée le phénomène). Pour MILES, les recolonisations végétales rapides, suite à des perturbations, expriment plus des mécanismes de "régénération" (ou de changements cycliques) que de véritables successions. Pour nous, la cicatrisation végétale des hauts-marais secondaires exprime le phénomène de "régénération" au sens de la recréation des milieux détruits, avec un contrôle de réussite par la réimplantation des sphaignes. Les mécanismes

écologiques qui se mettent en place répondent aux règles des successions. **La régénération exprime donc ici le phénomène général qui se déroule sur les milieux alors que la succession exprime les mécanismes mis en place pour assurer le dynamisme de la régénération.**

Par rapport aux mécanismes proposés par CONNELL & SLATYER (1977), les successions secondaires terrestres et aquatiques correspondent bien au modèle de "facilitation". Il y a modification du milieu par les espèces pionnières puis apparition des espèces de transition (p. ex. *S. fallax*). Dans ce sens, les sphaignes fonctionnent comme bénéficiaires (ou commensales) des espèces pionnières et profitent des conditions créées par celles-ci (BURROWS, 1990).

Les sphaignes sont associables aux espèces arborescentes lors des mécanismes de recolonisation forestière. La stratégie des deux groupes végétaux est analogue. Il y a nécessité de passer par une phase de cicatrisation du milieu par des espèces pionnières à large spectre écologique ou fortement adaptées aux conditions secondaires initiales. Puis, en accord avec le modèle de GRIME (1987), les sphaignes (ou les jeunes arbres) s'installent grâce à la mise à disposition de microhabitats favorables. Elles sont alors totalement *subordonnées*. Leur pouvoir compétitif et leur autoécologie leur assure une forte capacité auto-régulatrice du milieu. Elles peuvent ainsi devenir *dominantes* (comme les arbres qui recréent la forêt). L'analogie entre tapis de sphaignes et canopées forestières a déjà été proposée par BORCARD (1988) pour expliquer le mode de vie et la répartition spatiale des acariens des sphaignes au sein des tiges (troncs), rameaux (branches) et capitulum (couronnes). Nous trouvons remarquable que cette analogie de structure s'exprime de manière identique dans les mécanismes de stratégie de relations et de compétition lors de la (re)colonisation de milieux nus.

La cicatrisation initiale par les espèces pionnières et la colonisation des plans d'eau se calquent parfaitement sur le modèle proposé par GRIME (1974, 1987), qui fait appel à la notion des relations de dominance et de subordination. Lors de ses recherches de 1974, GRIME propose de caractériser les modes de colonisation par les stratégies de croissance des espèces (modèle CSR). Il met en place un triangle dont chaque sommet exprime une stratégie de croissance. Il distingue :

- Les communautés dominées par la compétition (C)
- Les communautés dominées par la tolérance au "stress" du milieu (S)
- Les communautés dominées par des espèces rudérales (R)

Les espèces dominantes sont celles qui ont la plus forte capacité de colonisation du sol et de l'air, de ramification et d'influence directe sur la vitalité des espèces voisines. *Eriophorum vaginatum*, *Polytrichum strictum* ainsi que *Potentilla palustris* et *Carex lasiocarpa* ou *C. rostrata* sont des espèces dominantes types. Nous situons les plantes aquatiques et *Eriophorum vaginatum* à mi-chemin entre les communautés "C" et "S", avec dominance pour "S". *Polytrichum strictum* présente une stratégie "S" typique. Les plantes rudérales dominent les sites à changement régulier. La compétition est de mise principalement sur les sites qui offrent nourriture et lumière en quantité suffisante. **Pour les milieux hostiles, comme la tourbe nue, la conservation des ressources est primoriale.** Dans ce sens, l'adaptation très bonne de chacune des espèces pionnières en fonction des conditions initiales témoigne que les formes de protection mise en place sont les mieux adaptées aux conditions locales. La croissance en touradons ou en radeaux permet d'augmenter la compétitivité face aux autres espèces en créant des structures protectrices impénétrables pour les autres espèces.

En conclusion, la convergence végétale et structurelle nette des trois séries nous permet de proposer un critère qualitatif de reconnaissance de la réussite de la régénération initiale d'une surface secondaire: **Si l'évolution d'un milieu mis à nu permet la reconstitution d'une phytocénose secondaire apparentée du point de vue de sa structure et de sa communauté végétale et animale à l'alliance du *Sphagnion magellanicum* (complexe de replats et buttes), la régénération est réussie.** Dès lors nous formulons l'hypothèse que les caractéristiques biologiques et l'homéostasie générale du milieu est suffisante pour lui assurer une intégration dans l'évolution "standard" des groupements des hauts-marais.

8.2. LE COMPLEXE ECOLOGIQUE OPTIMAL POUR INITIER LA REGENERATION

8.2.1. Environnement géomorphologique et histoire des exploitations

Comme nous l'avons déjà abordé lors du chapitre 6.2.8, la taille des hauts-marais joue un rôle primordial actuellement pour la dynamique interne de la végétation et, qui plus est, pour la réussite de la régénération. Les hauts-marais se sont formés dans les vallées jurassiennes dans les secteurs présentant les meilleures conjonctions entre les conditions géologiques du fond de la vallée et le mésoclimat induit par la topographie des flancs des vallées. A la grande diversité offerte, les complexes de hauts-marais se signalent par une variété de tailles et d'épaisseurs assez grandes, répondant ainsi aux diverses contraintes de l'environnement. Nous avons vu que la présence de sphaignes, en quantité importante sur une vaste surface, provoque des modifications notables des méso- et microclimats. Les fortes inversions de température nyctémérales permettent à la masse d'eau de condenser chaque nuit en toute saison, provoquant une saturation nocturne très importante pour le dynamisme du marais et la vitalité des espèces typiques.

L'homéostasie de la tourbière est assurée par sa capacité à influencer le climat, celui-ci provoquant une compétition de premier ordre face aux autres écosystèmes du Jura.

Par les atteintes historiques brutales et parfois drastiques que l'homme a infligé à ces milieux depuis près de 3 siècles, il a provoqué parfois une modification irréversible du fonctionnement interne et des conditions mésoclimatiques des paysages marécageux. Aux diminutions de surface de marais, il faut faire correspondre le drainage systématique des alentours, ainsi que la fragmentation des surfaces marécageuses (augmentation de l'effet de bordure) et l'environnement géomorphologique.

En effet, il nous paraît très important de distinguer les hauts-marais jurassiens en fonction de la largeur des vallées, de leur profondeur ainsi que de leur orientation dans l'axe des vents dominants et de leurs ouvertures longitudinales. Pour prendre trois exemples, la vallée des Ponts-de-Martel est très large, avec un fond plat uniforme, des flancs assez hauts et des extrémités assez bien fermées, surtout en ouest. Les tourbières originales ont pu couvrir 1500 ha et occuper l'entier du fond de la vallée, créant un vaste complexe de marais en relation étroite avec les ruisseaux exportant les eaux vers les dolines. Il ne reste aujourd'hui que 150 ha de haut-marais, bien heureusement concentrés en un complexe relativement dense dans la partie la plus basse de la vallée. **Nous constatons nettement que l'influence mésoclimatique des marais est liée aux secteurs encore fortement gorgés en eau.** Dès que l'on s'éloigne de quelques centaines de mètres, la topographie ouverte ne permet plus aux brouillards nocturnes et aux inversions

thermiques de se manifester avec autant d'acuité. Nous estimons que l'influence de la forte fragmentation des divers éléments marécageux (7 sous-objets inventoriés lors de l'Inventaire national, GRUENIG *et al.* 1986) est encore compensée par la masse générale restante mais que les exploitations de tourbe récentes (au coeur même du massif principal) provoquent un risque majeur pour l'ensemble par le dépassement d'un seuil critique, très difficile à définir avec précision. La dynamique secondaire est déjà influencée et nous constatons que les surfaces de tourbières périphériques, éloignées et détachées du complexe principal ont une plus faible présence de sphaignes en croissance.

La tourbière de Bellelay est par contre localisée au fond d'un petit vallon étroit et peu étendu, profondément enfoncé entre deux chaînes fortement boisées et hautes. La protection contre les vents est très bonne et l'effet d'inversion thermique est facilement mis en place. Ce site est caractérisé par une dynamique secondaire extrêmement forte, avec de nombreuses zones ayant retrouvé une végétation caractéristique des haut-marais. **Grâce à la topographie favorable, le mésoclimat n'a pas été modifié.**

A la tourbière des Pontins, le climat général est particulièrement rude et froid. Localisée au pied nord d'une forte pente boisée, la tourbière occupe une légère contre-pente avant la forte descente vers Saint-Imier. Là, le macroclimat est rude avec des températures particulièrement froides et un enneigement nettement plus long et important que pour les autres sites. **La température apparaît comme le facteur limitant principal de la dynamique**, l'humidité étant bien présente et assurant des brouillards locaux importants. Vu la situation générale du marais, l'exploitation de la tourbe a provoqué une diminution de la surface qui a modifié le mésoclimat du plateau des Pontins. L'étendue des brouillards nocturnes estivaux est ici nettement limitée à la surface de la tourbière et disparaissent très vite en bordure à cause des vents réguliers qui longent les flancs de Chasseral.

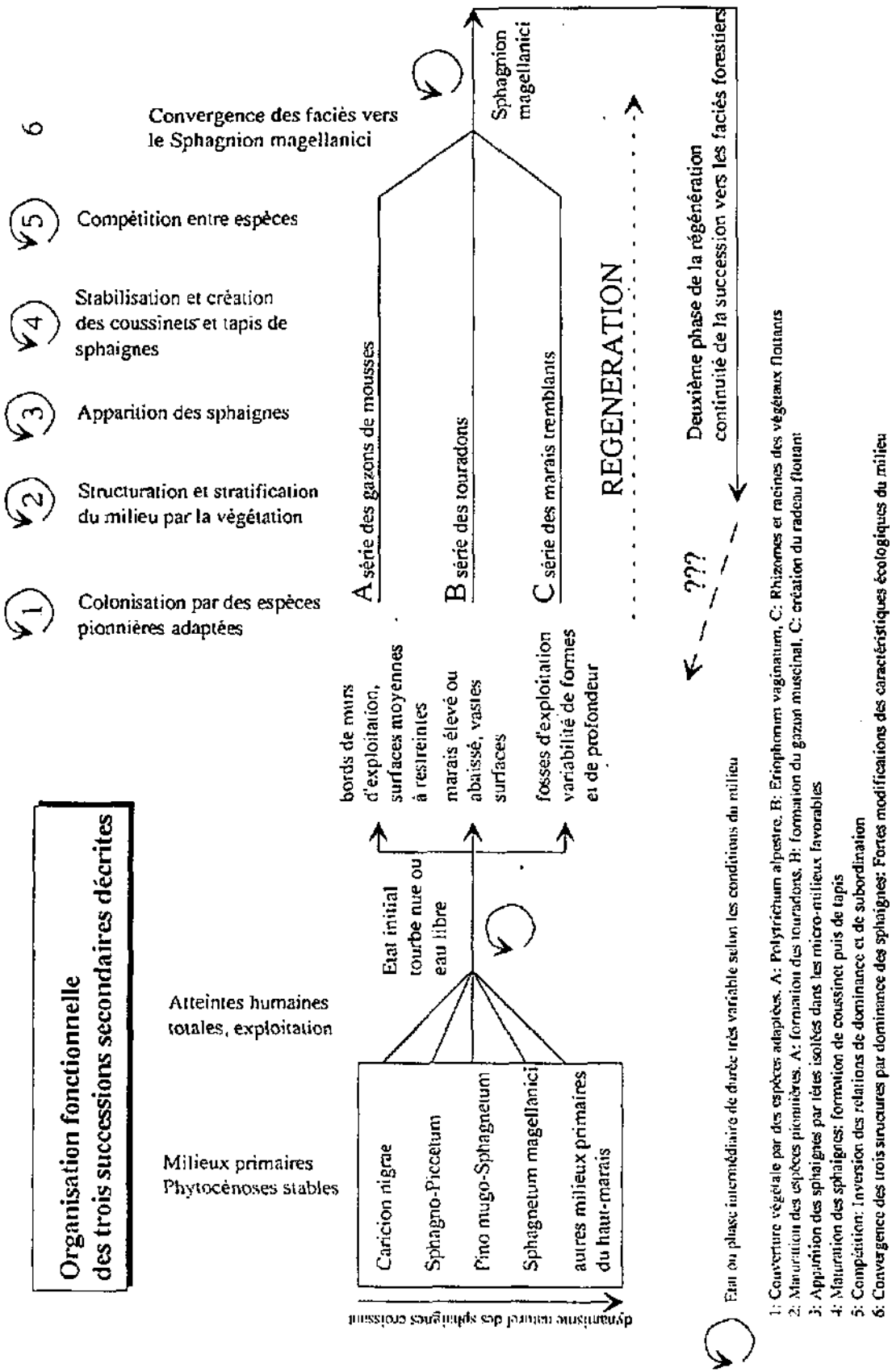
Dès lors, la réussite de la régénération, par la mise en place de successions secondaires dynamiques, est liée à l'importance de l'impact humain au niveau de l'ensemble du complexe géomorphologique, par la qualité des conditions mésoclimatiques induites par les relations "surfaces des marais - localisation dans les vallées - emprise du macroclimat". C'est à ce niveau qu'intervient la limitation temporelle que nous avons exprimée en introduction. Des travaux récents, présentés lors du 6^{ème} colloque suisse sur les marais, tenu à Zürich en mars 1992, indiquent que la dynamique actuelle des marais est fortement modifiée et perturbée par l'eutrophisation induite par la qualité des eaux de pluie (communications de SHOTYK, DUSSEX & HELD. HERTZ & KLOETZLI). Ces résultats provoquent un pessimisme certain quant aux chances réelles de survie des hauts-marais à long terme par la disparition des conditions oligotrophes nécessaires à leur dynamique. Sans pouvoir ici ni résoudre le problème ni trancher la question, ces données et prévisions indiquent clairement que la protection et le maintien de la diversité biologique se joue avant tout à une large échelle, plutôt que par des actions ponctuelles, même si celle-ci sont également indispensables.

8.2.2. Influence des conditions spécifiques aux sites sur la dynamique secondaire

8.2.2.1. La régénération en milieux terrestres

La mise à nu de la tourbe crée, indépendamment de l'épaisseur résiduelle, un milieu hostile à la végétation. Très fréquemment, l'épaisseur de tourbe exploitée provoque une perte totale du potentiel de germination ou de reproduction végétative du matériel (CLYMO & DUCKETT 1986, GROSVERNIER, 1996).

Figure 92: Description synthétique des trois successions décrites



Selon la définition de la régénération que nous avons posée, le but est de mettre en évidence les conditions optimales permettant à la végétation pionnière de prendre place pour compenser l'hostilité initiale du milieu, afin d'initier la réapparition des sphaignes et d'assurer leur dynamique de croissance.

En complément à la figure 92, nos résultats nous permettent d'indiquer:

- 1° Que l'épaisseur de tourbe n'est pas un facteur limitant
- 2° Que la dureté de l'exploitation (surface ouverte, volume extrait, quantité et qualité des drainages placés sur les sites) n'est pas un facteur primordial en soi mais qu'il doit être mis en relation avec la surface de marais restante et la géomorphologie de la vallée.
- 3° Que la présence d'une saturation hydrique permanente près de la surface n'est pas indispensable
- 4° Que l'évolution pédologique de surface joue un rôle important pour le bilan hydrique
- 5° Que la microtopographie joue un rôle important pour l'installation des espèces pionnières
- 6° Que les conditions micrométéorologiques au sol sont primordiales
- 7° Que l'effet de la végétation pionnière sur les conditions microclimatologiques est fondamental

Nos résultats indiquent clairement que les conditions initiales sont **particulièrement défavorables aux sphaignes**. Pour la tourbe nue, les variations thermiques estivales, avec des échauffements de surface jusqu'à près de 60°C, sont néfastes pour la germination. **L'évaporation** y est très importante, malgré la saturation nocturne garantie par le mésoclimat. Les **espèces pionnières** qui parviennent à s'implanter durablement sur ce substrat sont très spécialisées et montrent une tolérance au stress remarquable. Très rapidement, leur stratégie de croissance montre une "fuite" face à l'hostilité du milieu. Elles forment alors des **touradons** (*Eriophorum vaginatum*, *Molinia caerulea*) ou montrent des adaptations phénologiques (arrêt de croissance estivale des gazons de *Polytrichum strictum*).

Nous avons observé qu'en marais abaissé, les **effets de bord** et la meilleure accumulation temporelle de l'eau (cuvettes naturelles) semblent favoriser passablement l'apparition d'*Eriophorum vaginatum* qui forme des touradons hauts avec souvent une densité de souches plus grande qu'en marais élevé (différence entre Les Pontins et La Chaux-d'Abel, mais aussi entre les faciès des Ponts-de-Martel et de La Brévine). En marais élevé, les milieux les plus hostiles, **fortement exposés et érodés**, comme les bords de murs d'exploitation, limitent la cicatrisation à des espèces très peu exigeantes. *Polytrichum strictum* est dans le Jura l'espèce la plus fréquemment rencontrée.

Les résultats pédologiques et hydrodynamiques indiquent nettement qu'il y a une relation entre la dynamique de cicatrization végétale et les caractéristiques de la tourbe et des nappes. Les gazons de mousses sont en relation avec les sols où l'on met en évidence l'apparition d'un petit horizon de dégradation, compacté et diminuant fortement l'écoulement vertical de l'eau de pluie.

Même si nous n'avons pas pu démontrer formellement la présence de nappes perchées, le rôle de cet horizon sur le ralentissement de l'écoulement, donc de l'augmentation de l'accessibilité de l'eau de pluie en surface est évident. **Dans ce sens, les sols à microtopographie perturbée sont plus favorables à la régénération.** En présence d'*Eriophorum vaginatum*, la mise en place de nappes perchées a également été démontré mais sans la mise en évidence d'un horizon spécifique et bien marqué.

Les modifications propres au substrat tourbeux apparaissent donc comme primordiales pour permettre la première phase de la cicatrization végétale. La dynamique de la succession est donc avant tout liée à une évolution pédologique, dont on sait que la vitesse est très variable, même pour des sols totalement organiques. Nous considérons que cette hypothèse est principalement valable pour les marais secondaires élevés, "naturellement" drainés et plus fortement asséchés lors des exploitations. Il n'est dès lors pas surprenant de rencontrer les stades les plus évolués de la régénération en milieu abaissé, là où l'eau a tendance à s'accumuler, favorisant la croissance d'*Eriophorum vaginatum* par une hostilité moindre du milieu.

En deuxième phase, la capacité des espèces pionnières à structurer le milieu permet des modifications diverses, marquées principalement au niveau microclimatologique. En effet, nous avons quantifié et hiérarchisé au chapitre 6 les modifications microclimatiques jouées par les structures végétales initiales.

Les gazons de mousses ne sont pas réellement plus favorables à la croissance des sphaignes que la tourbe nue exposée. Leur influence est plus phénologique que climatique, en offrant un milieu dynamique favorable aux sphaignes en période vernale et lors des orages d'été. La croissance des sphaignes y est lente voir problématique. Les relations avec les milieux voisins nous semblent très importantes. Au Cachot p. ex. il y a un net gradient entre le bord du mur et le haut-marais primaire. Comme la présence des sphaignes modifie nettement les conditions microclimatiques locales (température et évaporation) et crée une forte régulation sur le milieu, nous formulons l'hypothèse

d'une relation directe entre la capacité des sphaignes à assurer une compétition favorable face à *Polytrichum strictum* et le réservoir végétal primaire

qui assure une avance latérale des sphaignes par modifications lentes mais durables des conditions thermiques et hydriques. Il y a mise en place d'un écotone typique, dynamique et se déplaçant sous l'effet dominant du réservoir primaire. Dans ce sens, il y a analogie évolutive avec la colonisation latérale des fosses d'exploitation vers les bordures sèches (cf. 8.2.2.2. ci-après)

Pour les faciès à *Eriophorum vaginatum*, les modifications microclimatiques liées aux microhabitats structurels créés en bordure des souches sont prioritairement déterminantes pour expliquer la réussite de la régénération.

Dans un premier temps, l'effet protecteur thermique et hydrique des cavités permet la mise à disposition de volumes favorables à l'implantation de sphaignes pionnières. Une fois des petits coussinets créés et épaissis, **les sphaignes elles-mêmes influencent le microclimat des cavités et des entre-souches** en augmentant l'humidité de l'air au dessus du sol, en diminuant l'évaporation et en régulant la température au niveau des capitulum et de l'air sus-jacent. Les cavités jouent alors un rôle de centre de colonisation à partir desquels les coussinets s'avancent vers l'extérieur et sur les touradons eux-mêmes. **L'auto-régulation mise en place par les sphaignes leur permet d'augmenter leur compétitivité face aux touradons.** D'un statut d'espèces subordonnées, elles deviennent dominantes, subordonnant *Eriophorum vaginatum* dont la vitalité diminue alors fortement.

8.2.2.2. La régénération en milieu aquatique

Les fosses d'exploitation accumulent spontanément de l'eau issue de la tourbière elle-même. Dès lors, les conditions physico-chimiques apparaissent *a priori* comme favorables, pour autant que la fosse soit localisée à l'intérieur du haut-marais, sans contact direct avec les terrains agricoles de bordure, ce qui est de loin, le cas le plus fréquent (132 situations /137 selon la typologie).

Dès lors le type de la végétation qui va pouvoir coloniser le **plan d'eau** est principalement lié à des critères physiques, comme la profondeur de la fosse et du plan d'eau, la permanence et le volume de l'inondation, la **topographie des berges**, la présence d'un écoulement actif ou encore l'épaisseur de la tourbe résiduelle (définissant la nature du fond de la fosse).

Comme pour les milieux terrestres, la figure 92 et nos résultats nous permettent d'affirmer:

- 1° Que la localisation de la fosse dans le haut-marais est moyennement importante
- 2° Que la qualité chimique de l'eau est importante, en relation avec 1°
- 3° Que l'architecture de la fosse est primordiale
- 4° Que le type de succession mis en place est directement dépendant de 3°
- 5° Qu'un support végétal est indispensable pour assurer la croissance des sphaignes en cas de forte profondeur du plan d'eau

La connaissance des données sur l'architecture de la fosse et la qualité chimique de l'eau permet de prédire presque en parallèle la vitesse de la régénération ainsi que pour une bonne part, la typologie des faciès végétaux qui vont se succéder. Nous considérons en effet que les successions végétales secondaires potentielles de ces fosses sont identiques aux voies évolutives primaires mises en évidence par nos observations directes (tourbières flottantes des effondrements volcaniques du massif central, colonisation des lacs de Bellefontaine, des Mortes ou du Trouillot dans le Jura) et les descriptions de la littérature. Pour le Jura, nous citerons uniquement les travaux de ROYER *et al.* (1978) qui présentent les successions végétales menant des bas-marais et marais de transition aux hauts-marais.

Avec des fosses aux berges aplanies, créant un gradient d'humidité et de profondeur, la recolonisation végétale est facilitée. Comme nous l'avons montré par l'étude de notre succession, il faut offrir aux sphaignes un support végétal afin qu'elles puissent s'étendre sur le plan d'eau et finalement le couvrir. A partir d'un radeau lâche de rhizomes et de racines, la régénération est possible et présente alors une vitesse qui peut être remarquable. Très rapidement, la croissance verticale des sphaignes se marque et de jeunes buttes sont initiées. Nous avons montré qu'à la structuration du sol en "horizons" correspond également une différenciation hydrodynamique entre les buttes et les replats. De petites niches écologiques s'individualisent avec une spécialisation végétale rapide.

Les fosses profondes, aux parois verticales ont des eaux froides. La végétation ne bénéficie pas de supports initiaux pour se fixer et commencer la colonisation. Les expériences pratiques menées par GROSVERNIER (1996) dans des fosses expérimentales montrent que les sphaignes ne peuvent pas s'implanter durablement et qu'en hiver sous l'effet de la masse de glace formée, elles coulent et pourrissent sur le fond. Avec de telles physionomies, les fosses restent en eau extrêmement longtemps et empêchent la régénération du marais.

Une fois que la croissance végétale a atteint le niveau maximal de la fosse, les conditions du milieu permettent une progression latérale de la végétation qui profite alors des protections climatiques de la végétation chaméphytique des berges. En été en effet, sous le couvert protecteur des feuilles denses de *Vaccinium uliginosum*, les sphaignes bénéficient de conditions climatiques similaires à celles des cavités d'*Eriophorum vaginatum*. Il y a une forte diminution de l'évaporation au-dessus du sol ainsi qu'une baisse de la température de l'air ambiant. Comme dans le cas particulier du Cachot pour les gazons de mousses, les conditions hydriques et dynamiques dans la fosse favorisent la croissance latérale des tapis de sphaignes vers les sous-bois forestiers qui les bordent. A la différence de la situation particulière du Cachot, nous considérons que cette situation en bordure des fosses est fréquente dans les tourbières du Jura.

Nous considérons de plus qu'en cas de pente douce, les sphaignes sont capables de s'installer en parallèle aux autres végétaux et de coloniser le plan d'eau depuis le bord en parfaite complémentarité.

8.3. POSSIBILITE ET LIMITE DE LA GESTION DES SUCCESSIONS SECONDAIRES OU: COMMENT FAVORISER LA REGENERATION ?

8.3.1. La gestion des milieux secondaires

La mise sous protection nationale des hauts-marais, suite à l'Inventaire mené par GRUENIG *et al.* (1986) et à l'acceptation par le peuple suisse de l'Initiative fédérale sur la protection des paysages marécageux d'une beauté particulière impose à chaque canton de mettre en application la notion de protection et de mise en valeur de ce patrimoine fortement perturbé.

Une protection moderne ne vise pas simplement une mise en "réserve" au sens légal mais doit s'intéresser à la dynamique évolutive des milieux protégés, aux vocations à donner aux différents objets définis et à leurs relations spatiales les uns avec les autres et avec les écosystèmes qui les bordent.

Il faut dès lors travailler à la connaissance précise de la répartition spatiale des types de milieux qui forment le haut-marais afin d'en définir sa richesse, ses atteintes et son rôle dans la protection des populations animales et végétales typiques. Pour des milieux à caractère oligotrophe comme les hauts-marais, des zones de transition adaptées (protection hydrique, mécanique et effet tampon) à la topographie locale et à l'histoire du marais doivent être mise en place afin d'assurer le maintien ou reconstituer l'autonomie fonctionnelle du marais. A l'intérieur de l'objet, l'analyse des types de milieux inventoriés permet d'en donner une ou plusieurs vocations et d'en orienter la gestion.

Pour les objets à vocation de réservoirs faunistiques et floristiques, la gestion doit viser:

- de maintenir les milieux oligotrophes présents
- de favoriser la croissance des sphaignes
- d'assurer la régénération des surfaces secondaires perturbées

Ce travail permet de fournir quelques données en vue de l'orientation de la régénération des milieux secondaires.

Avant la définition des interventions pratiques, nous considérons comme indispensable de replacer l'objet à gérer dans son contexte géomorphologique et historique global. Comme nous l'avons indiqué au chapitre 8.2.1, la vocation générale de chaque haut-marais doit être pondérée par l'histoire des exploitations. Il est important de tenir compte de l'importance de la diminution de surface de l'objet par rapport à la topographie générale de la vallée dans lequel il se trouve et de l'influence de sa taille actuelle sur les modifications mésoclimatiques.

Dès lors il est envisageable que certains hauts-marais aient atteint la taille critique alors que la typologie montre actuellement encore des milieux à sphaignes dynamiques. Si la relation générale de la tourbière avec ses écosystèmes voisins est en faveur de ces derniers, il est fort probable que la végétation de marais soit condamnée. A l'inverse de grands marais fortement perturbés peuvent offrir un potentiel de régénération important même si actuellement de vastes surfaces sont dénudées.

Une fois ce travail initial achevé, les projets de gestion interne peuvent être mis en place. Pour nous, les résultats principaux de ce travail indiquent qu'il faut orienter les interventions dans le but d'initier ou de recréer les structures protectrices favorables aux sphaignes. Le microclimat étant primordial, des aménagements ponctuels visant une protection thermique au niveau du sol (ombrage), ou mieux encore bloquant l'évaporation naturelle du sol pour provoquer des condensations nocturnes sont parfaitement envisageables.

Le but à viser est de recréer une structuration végétale sur la tourbe nue afin que la végétation, une fois bien installée, puisse offrir des conditions nouvelles favorables aux sphaignes. Pour nous, il est parfaitement illusoire d'intervenir sur les surfaces écobuées directement avec des sphaignes, sauf si l'on crée des mini-serres protectrices, en lieu et place des touradons d'*Eriophorum vaginatum*.

Pratiquement, vu l'importante présence d'*Eriophorum* sur chaque site, la solution la plus simple et pratique à organiser est celle de récolter des graines et de les semer sur les surfaces à cicatrifier. Pour accélérer le processus dynamique, il est également envisageable de désoucher quelques

jeunes buttes dans les secteurs les plus denses afin de les fragmenter et de planter directement des jeunes individus.

Pour les bords de murs d'exploitation, le blocage de l'évaporation apparaît comme une solution prometteuse suite à l'expérience fortuite menée par G. MULHAUSER lors de son travail de Licence. En plaçant sur la tourbe nue des pièges à émergence pour l'entomofaune, constitués d'un cône de plexiglas surmonté d'un piège collecteur, l'effet de serre provoqué sur la surface couverte a initié l'apparition d'un jeune gazon muscinal, avec plusieurs laïches, et ce, sur notre site de Martel-Dernier. Il est donc parfaitement possible de permettre la germination des spores et graines accumulées depuis 40 ans sur les surfaces écobuées de nombreuses anciennes exploitations.

8.3.2. Propositions de recherches futures

Nous ne terminerons pas ce travail sans formuler quelques propositions pour de futures recherches. Si la gestion des milieux secondaires est importante face aux atteintes portées à ces milieux fragiles, elle ne peut être orientée correctement que sur des bases scientifiques solides. Dès lors, il est important de poursuivre et d'accentuer l'effort entrepris depuis de nombreuses années sur le fonctionnement des hauts-marais jurassiens par les différents Laboratoires de l'Université de Neuchâtel, en relations étroites avec les praticiens et chercheurs des bureaux privés. En accord avec NOBLE & SLATYER (1980), nous considérons qu'à l'avenir, les recherches sur les modélisations des successions doivent tenir compte de l'"attribut vital" des espèces concernées. Selon ces auteurs, l'attribut vital permet de tenir compte des performances (degré d'informations) des espèces durant la succession. Ces attributs incluent la méthode de l'arrivée ou de la maintenance de l'espèce suite à une perturbation, sa capacité à entrer dans une communauté existante, de croître jusqu'à maturité ainsi que le temps pris par une espèce pour atteindre l'état critique de son cycle vital (dégénérescence). Répondant à cette orientation nous proposons:

- une étude sur l'autécologie d'*Eriophorum vaginatum*, orientée sur les stratégies de germination.
- une étude sur l'approche synusiale intégrée des surfaces secondaires ouvertes.
- une étude des relations spatio-temporelle fines entre *Polytrichum strictum* et les sphaignes, avec des observations diachroniques sur des placettes de suivis.
- une étude sur l'importance et les mécanismes de dissémination des sphaignes dans les microhabitats favorables par rapport aux surfaces écobuées (en particulier le rôle de la faune).
- une étude fine sur la capacité des sphaignes à modifier et contrôler le microclimat en fonction de leur densité et des surfaces couvertes dans l'optique de mettre en évidence un éventuel seuil d'auto-fonctionnalité selon les différents milieux.

Plus généralement, nous proposerons encore une étude:

- sur les phases terminales des successions secondaires, en particulier par les étapes forestières.
- sur le rôle microclimatique des arbres isolés en relation avec la dynamique des sphaignes.
- sur les écoulements hydriques latéraux en fonction des qualités de la tourbe, en particulier en présence des fosses d'exploitation et des milieux latéraux "asséchés".
- sur une large échelle afin de définir les modifications mésoclimatiques liées à la diminution des surfaces originelles, aux types de végétation actuels et à la topographie des vallées.
- sur le rôle de l'eutrophisation par les pluies sur la productivité des sphaignes en conditions primaires et secondaires.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- AFES (1992), - Référentiel Pédologique des principaux sols d'Europe. *INRA*. : 222 pp.
- Achminova, M.P. (1985), - Der Einfluss von Sphagnum und Polytrichum commune auf die Dynamik der Quantität des Aufgehens von Fichten. *Lesovedenie*. 1: 48-52
- Aeby, P. (1990), - Mise en place de méthodes permettant de suivre l'évolution de la nappe, du sol, de la flore et de la faune dans les milieux perturbés par l'obturation de tarreaux. Chaux-des-Breuleux et Gruère. *Trav. Lic. Univ. Neuchâtel*. : 157 pp.
- Ahti, E. (1987), - Water balance of drained peatlands on the basis of water table simulation during the snowless period. *Communications Instituti Forestalis Fenninae*. 141: 64 pp.
- Anderson, H. & Hepburn, A. (1986), - Variation of humic substances within peat profiles. in Fuchsmann, C.H. ed: *Peat and Water*. 10: 177-194
- Andreux, F. (1978), - Etude de la stabilisation physico-chimique et biologique d'acides humiques - modèles. *Thèse doct. Etat, Univ. Nancy I*.
- Auroi, C. (1975), - Etude comparative de quelques associations végétales dans la tourbière du Cachot: Caractères microclimatiques et phénologie. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. Nat.* 98: 125-148
- Backéus, I. (1988), - Weather variables as predictors of Sphagnum growth on a bog. *Holarctic Ecology*. 11: 146-150
- Baden, W. & Eggelsmann, R. (1964), - Der Wasserkreislauf eines nordwestdeutschen Hochmoores. *Schriftenr. Kurat. Kult., Hamburg*. 12: 1-156
- Barbault, R. (1981), - Ecologie des populations et des peuplements. Des théories aux faits. *Masson, Paris*. : 200 pp.
- Barbault, R., Blandin, P. & Meyer, J.A. (ed.) (1980), - Recherches d'écologie théorique, les stratégies adaptatives. *Maloine SA, Paris*.
- Barber, K.E. (1981), - Peat stratigraphy and climatic change: A paleoecological test of the theory of cyclic peat bog regeneration. *Flück-Wirth*. : 219 pp.
- Barclay-Estrup, P. (1971), - The description and interpretation of cyclical processes in a heath community. III. Microclimate in relation to the Calluna cycle. *J. Ecol.* 59: 143-166
- Barriso, E. (1982), - Révision de quelques méthodes chimiques et physiques d'analyse des acides humiques et fulviques. *D.A.E. de biologie et physiologie végétale. Univ. Nancy I.* : 28 pp.
- Bascomb, C.L., Banfield, C.F. & Bruton, G.O. (1977), - Characterization of peaty materials from organic soils (histosols) in England and Wales. *Geoderma*. 19: 131-147
- Basset, Y. (1984), - Contribution à la connaissance des peuplements d'arthropodes sur Pinus mugo Turra dans les tourbières du Haut-Jura neuchâtelois. *Trav. Lic. Univ. Neuchâtel*. : 201 pp.
- Berenyi, D. (1967), - Mikroklimatologie. *G. Fischer Budapest*. : 328 pp.
- Bertram, R. (1988), - Pflanzengesellschaften der Torstiche nordniedersächsischer Moore und die Abhängigkeit dieser Vegetationseinheiten von der Wasserqualität. *Dissertationes Botanicae*. 126: 192 pp.
- Björbäck, F. & Norling, L. (1984), - Discriminant analysis of stem- and branch leaf variation in *Sphagnum subfulvum* Sjörs and *S. subnitens* Russow & Warnst.. *Lindbergia*. 10: 169-174
- Blankenburg, J. & Kuntze, H. (1987), - Moorkundlich-hydrologische Voraussetzungen der Wiedervernässung von Hochmooren. *Telma*. 17: 51-58
- Bonneau, M. & Souchier, B. (1979), - Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol. *Masson, Paris*. : 459 pp.

- Borcard, D.** (1988), - Les Acariens Oribates des sphaignes de quelques tourbières du Haut-Jura suisse. *Thèse, Univ. Neuchâtel.* : 261 pp. + 170 pp
- Bowden, R.D.** (1991), - Inputs, outputs, and accumulation of nitrogen in an early successional moss (Polytrichum) ecosystem. *Ecological Monographs.* 61: 207-223
- Brown, J.M.** (1976), - Peat temperature regime of a Minnesota bog and the effect of canopy removal. *J. of appl. Ecol.* 13: 189-194
- Brown, V.K. & Southwood, T.R.E.** (1987), - Secondary succession: Patterns and strategies. in *Gray, A.J., Crawley, M.J. & Edwards, P.J. (Ed.): Colonization, succession and stability.* 15: 315-337
- Bruckert, S., Andreux, F., Correa, A., Ambouta, K. & Souchier, B.** (1978), - Fractionnement des agrégats appliqué à l'analyse des complexes organo-minéraux des sols. *Note technique C.P.B. 22. CNRS Nancy.*
- Buchter, B.** (1984), - Untersuchung des Wasserhaushaltes in einem inhomogenen anisotropen sickersystem, dargestellt an einem Rendzina-Boden. *Diss. ETH 7682 (Zürich).* : 193 pp.
- Burger, A.** (1959), - Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. *Bull. Soc. neuchâtel. Géogr.* 52: 5-304
- Burrows, C.J.** (1990), - Processes of vegetation changes. *Chapman and Hall.* : 551 pp.
- Buttler, A.** (1987), - Etude écosystémique des marais non boisés de la Rive Sud du lac de Neuchâtel (Suisse). *Thèse, Univ. Neuchâtel.* : 284 pp.
- Buttler, A.** (1991), - Application de macrocommandes pour Mulva-4. *inédit. Univ. Neuchâtel* 20 pp.
- Buttler, A. Cornali, P. & Richard, J.-L.** (1983), - La tourbière des Pontins sur Saint-Imier. *Mat. Levé Géobot. Suisse.* 59: 79 pp.
- Buttler, A. Diné, H. & Lévesque, M.P.** (1994), - Effects of physical, chemical, and botanical characteristics of peat on carbon gas fluxes. *Soil Science* 158(5): 365-374.
- Chamayou, H. & Legros J.-L.** (1989), - Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. *Presses Univ. de France, coll. tech. vivantes.* : 593 pp
- Chapin, F.S. III, van Cleve, K. & Chapin, M.C.** (1979), - Soil temperature and nutrient cycling in the tussock growth form of Eriophorum vaginatum. *J. Ecol.* 67: 169-189
- Chapman, S.B.** (1964), - The ecology of Coom Rigg Moss, Northumberland. II: The chemistry of peat profiles and the development of the bog system. *J. Ecol.* 52: 315-321
- Chastain, A** (1952), - Recherches écologiques et floristiques sur le Pinetum de la haute tourbière de la Vraconnaz (Jura helvétique vaudois). *Rec. Trav. Inst. Bot. Univ. Montpellier* 2: 1-17
- Chodat, R., Favre, G., De Girard, R. et al.** (1896), - Notice sur les exploitations minérales de la Suisse. *P. Dürr. Genève.* : 256 pp
- Clements F.E.** (1916), - Plant succession: an analysis of the development of vegetation. *Carnegie Inst. Washington Publ.* 242: 1-51
- Clymo, R.S.** (1970), - The growth of Sphagnum: Methods of measurement. *J. Ecol.* 58: 13-49
- Clymo, R.S.** (1983), - Peat. in: *Mires: Swamp, bog, fen and moor, a general study* (ed. A.J.P. Gore). 4a: 159-224.
- Clymo, R.S. & Duckett, J.G.** (1986), - Regeneration of Sphagnum. *The New Phytol.* 102: 589-614
- Collins, N.J.** (1976), - Growth and population dynamics of the moss Polytrichum alpestre in the maritime Antarctic. Strategies of growth and population dynamics of tundra plants. *Oikos.* 27: 389-401
- Connell, J.H. & Slatyer, R.O.** (1977), - Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *Am. Nat.* 111: 1119-1144

- Damman, A.W.H. (1978), - Distribution and movement of elements in ombrotrophic peat bogs. *Oikos*. 30: 480-495
- Daniels, R.E. & Eddy, A. (1985), - Handbook of european sphagna. *Inst. of Terrestrial Ecol. (Nat. Env. Research Council)*. : 262 pp.
- Daniel, R. (1985), - Major lines or variation in the vegetation of British peatlands. *Aquilo Ser. Bot.* 21: 61-67
- Dierssen, K. & Dierssen, B. (1984), - Vegetation und Flora der Schwarzwaldmoore. *Beihefte zu Veröffent. für Naturschutz und Landschafts. Baden-Württemberg*. 39: 512 pp.
- Dierssen, K. & Dierssen, B. (1985), - Suggestions for a common approach in phytosociology for scandinavian and Central European mire ecologists. *Aquilo Ser. Bot.* 21: 33-44
- Dietz, H. J. (1978), - Bemerkungen zum Problem "Torfabbau-Wiederrichtung-Renaturierung". *Telma* 8:309-313
- Dinel, H. & Lévesque, M.P. (1976), - Une technique simple pour l'analyse granulométrique de la tourbe en milieu aqueux. *Can. J. Soil Sci.* 56: 119-120
- Dinel, H., Larouche, A. & Lévesque, M.P. (1983), - Evaluation de deux méthodes de quantification des macrofossiles dans les matériaux tourbeux. *Naturaliste Can.* 110: 429-434
- Dinel, H., Richard, P.J.H., Lévesque, M.P. & Larouche, A. (1986), - Origine et évolution du marais tourbeux de Keswick, Ontario, par l'analyse pollinique et macrofossile. *Can. J. Earth Sci.* 23: 1145-1155
- Domergue-Greter, F.L. (1981), - Les tourbes: matière organique, minéralisation et classification. *Pédologie. EPFL*. 8: 134 pp.
- Drury, W.H. & Nisbet, I.C.T. (1973), - Succession. *J. Arnold Arboretum*. 54: 331-368
- Duchaufour, Ph. (1984), - Pédologie. *Masson. Paris*. : 220 pp.
- Eberhardt, A. & Krähenbühl, C. (1952), - La tourbière des Pontins sur St-Imier. Etude bryologique, pollenanalytique et stratigraphique. *Ber. Geobot. Forschungsinst. Rübel (ed. Rübel & Liidi)*. 1951: 87-122
- Eggelsmann, R. (1971), - Ueber den hydrologischen Einfluss der Moore. *Telma*. 1: 37-48
- Eggelsmann, R. (1977a), - Bodenhydrologie und Moorschutz. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 25: 705-708
- Eggelsmann, R. (1977b), - Moorschutz und Hydrologie. *Wasser und Boden*. 12: 350-351
- Eggelsmann, R. (1978), - Oxydativer Torfverzehr in Niedermoor in Abhängigkeit vom Klima und mögliche Schutzmassnahmen. *Telma*. 8: 75-81
- Eggelsmann, R. (1980), - Oekohydrologische Aspekte zur Erhaltung von Moorgewässern. *Telma*. 10: 173-196
- Eggelsmann, R. & Schuch, M. (1976), - Moorhydrologie. in: K. Göttlich (ed.) *Moor und Torfkunde*. : 153-162
- Egler, F.E. (1954), - Vegetation science concepts. 1° Initial floristic composition, a factor in old field vegetation development. *Vegetatio*. 4: 412-417
- Egloff, T. & Naef, E. (1982), - Grundwasserstandsmessung in Streuwiesen des unteren Reusstales. *Ber. Geobot. Inst. ETH Stiftung Rübel. Zürich*. 49: 154-194
- Eigner, J. & Schmatzler, E. (1991), - Handbuch des Hochmoorschutzes. Bedeutung, Pflege, Entwicklung. *Naturschutz Aktuell*. 4: 158 pp.
- Feldmeyer-Christe, E. (1990), - Etude phyto-écologique des tourbières des Franches-Montagnes (Cantons du Jura et de berne, Suisse). *Mat. Levè Géobot. Suisse*. 66: 163 pp.

- Firbas, F. (1931), - Untersuchungen über den Wasserhaushalt der Hochmoorpflanzen. *Jahrb. Wiss. Bot.* 74 (4-5): ??
- Flaig, W. (1986), - Some basic principles of water management in peat. in *Fuchsmann, C.H. ed: Peat and Water*. 7: 119-132
- Francez, A.J. (1990), - Production primaire et accumulation de matière organique dans les tourbières à Sphaignes des Monts du Forez (Puy-de-Dôme). Influence des activités humaines sur leur fonctionnement et leur évolution. *Ministère de l'Environnement, S.R.E.T.I.E. / C.E.R.E.M.C.A.*. Thèse: 397 pp.
- Francez, A.J. (1992), - Croissance et production primaire des sphaignes dans une tourbière des Monts du Forez (Puy-de-Dôme, France). *Vie et Milieu*. 42: 21-34
- Frenzel, B. (1983), - Mires - repositories of climatic information or self-perpetuating ecosystems ?. *Mires: Swamp, bog, fen and moor, a general study (ed. A.J.P. Gore)*. 4a: 35-66
- Früh, J. & Schröter, C. (1904), - Die Moore der Schweiz mit Berücksichtigung der gesamten Moorfrage. *A. Franke, Bern*. : 751 pp.
- Gallandat, J.D. (1982), - Prairies marécageuses du Haut-Jura. *Mat. Levé Géobot. Suisse*. 58: 327 pp.
- Galland, P. (1982), - Etude de la végétation des pelouses alpines au Parc National Suisse. *Thèse, Univ. Neuchâtel*. : 177 pp.
- Gauch, H.G. (1982), - Multivariate analysis in community ecology. *Cambridge Univ. Press*. 298 pp.
- Geiger, W. (1980), - Phytosociologie des landes de dégradation dans la tourbière du Cachot (Jura neuchâtelois, Suisse). *Documents Phytosociologiques. N.S.* V: 5-10.
- Gerber, H. (1989), - Die Räumliche Verteilung der Hochmoore im Zusammenhang mit dem Karst der zentralen und östlichen Freiberge. *Inédit. Trav. Dipl. Univ. Fribourg (CH)*.
- Gerdol, R. (1987), - Discrimination of Sphagnum sect. Acutifolia based on a quantitative expression of stemleaf forms. *Lindbergia*. 13: 150-154
- Gies, T. (1973), - Vegetation und Ökologie des Schwarzen Moores (Rhön) unter besonderer Berücksichtigung des Kationengehaltes. *Dissertationes Botanicae*. 20: 184 pp.
- Giller, K.E. & Wheeler, B.D. (1988), - Acidification and succession in a flood-plain mire in the Norfolk Broadland, U.K.. *J. Ecol.* 76: 849-866
- Gillet, F. (1982), - L'alliance du Sphagno-Tomenthypnion dans le Jura. *Documents Phytosociologiques. N.S.* VI: 155-180
- Gillet, F. (1986), - Les phytocoenoses forestières du Jura nord-occidental. Essai de phytosociologie intégrée. *Thèse, Univ. Besançon*. : 604 pp.
- Gillet, F. & Guenat, C. (1983), - Etude phytosociologique du marais de Porsel. *Bull. Soc. vaud. Sci. Nat.* 76: 257-279
- Giugni, G. (1991), - Etude phyto-écologique des bas-marais et marais de pente (Caricion davallianae) des préalpes chablaisiennes (suisses et françaises). *Mat. Levé Géobot. Suisse*. 67: 289 pp.
- Gobat, J.M. (1984), - Ecologie des contacts entre tourbières acides et bas-marais alcalins dans le Haut-Jura Suisse. *Thèse, Univ. Neuchâtel*. : 255 pp.
- Gobat, J.M. & Portal, J.M. (1985), - Caractérisation de cinq tourbes oligotrophes représentatives d'une dynamique de la végétation dans le Jura Suisse. *Sci. Sol.* 2: 59-74
- Gobat, J.M., Grosvernier, Ph. & Matthey, Y. (1986), - Les tourbières du Jura Suisse. Milieux naturels, modifications humaines, caractères des tourbes, potentiel de régénération. *Actes Soc. Jura. d'Emul.* : 213-315

- Gobat, J.M., Grosvernier, Ph., Matthey, Y. & Buttler, A. (1991), - Un triangle granulométrique pour les tourbes: analyse semi-automatique et représentation graphique. *Sciences du Sol*. 29: 23-35
- Gore, A.J.P. (1983), - Ecosystems of the world, mires: swamp, bog, fen and moor: Introduction. *Mires: Swamp, bog, fen and moor: a general studies (ed A.J.P. Gore)*. 4a: 1-34
- Grandvoinet, D., Bruckert, S. & Campy, M. (1988), - Formation et organisation d'une tourbe acide du Jura. *Science du Sol*. 26: 55-64
- Grime, J.P (1974), - Vegetation classification by reference to strategies. *Nature*. 250: 25-31
- Grime, J.P. (1987), - Dominant and subordinate components of plant communities: Implications for succession, stability and diversity. in Gray, A.J., Crawlay, M.J. & Edwards, P.J. (Ed.): *Colonization, succession and stability*. 20: 413-428
- Grosse-Brauckmann, G. (1974), - Ueber Pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. II: Weitere Reste (Früchte und Samen, Moose u.a.) und ihre Bestimmungsmöglichkeiten. *Telma*. 4: 51-117
- Grosse-Brauckmann, G. (1972), - Ueber Pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. I. Gewebereste krautiger Pflanzen und ihre Merkmale. *Telma*. 2: 19-55
- Grosvernier, Ph. (1996), - Stratégies et génie biologique des sphaignes (*Sphagnum sp.*) dans la restauration spontanée des marais jurassiens suisses. Une approche expérimentale. *Thèse Univ. de Neuchâtel*.
- Grünig, A., Vetterli, L. & Wildi, O. (1986), - Les hauts-marais et marais de transition de Suisse. *Inst. Féd. Rech. Forest. Birmensdorf*. 281: 58 pp.
- Guinochet, M. (1955), - Carte phytosociologique au 1/20'000 Pontarlier Sud-Ouest., *Serv. de la carte des groupements vég. de la France., C.N.R.S. et Inst. Nat. de Géog.*
- Hayward, P.M. & Clymo, R.S. (1983), - The growth of *Sphagnum* : Experiments on, and simulation of, some effects of light flux and water-table depth. *J. Ecol.* 71: 845-863
- Henin, S. (1976), - Cours de physique du sol, tomes I. *Editest/Orstom, Bruxelles et Paris*. : 159 pp.
- Henin, S. (1977), - Cours de physique du sol, tomes II. *Editest/Orstom, Bruxelles et Paris*. : 222 pp.
- Hillel, D. (1971), - Soil and water: Physical principles and Processes. *Academic Press. N.-Y.* : 288 pp.
- Hillel, D. (1980), - Fundamentals of soil physics. *Academic Press. N.-Y.* : 413 pp.
- Hück, K. (1925), - Vegetationsstudien auf brandenburgischen Hochmooren. *Beitr. z. Naturdenkmalpflege*. 10: 309-408
- Hück, K. (1928), - Die Vegetation und Oberflächengestaltung der Oberharzer Hochmoore. *Beitr. z. Naturdenkmalpflege*. 12:
- Ingram, H.A.P. (1978), - Soil layers in mires: function and terminology. *J. Soil Sci.* 29: 224-227
- Ingram, H.A.P. (1983), - Hydrology. *Mires: Swamp, bog, fen and moor, a general study (ed. A.J.P. GORE)*. 4a: 67-158
- Ischer, A. (1935), - Les tourbières de la vallée des Ponts-de-Martel. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. Nat.*, 60: 77-164
- Janssens, J.A. (1983a), - A quantitative method for stratigraphic analysis of bryophytes in holocene peat. *J. Ecol.* 71: 189-196
- Janssens, J.A. (1983b), - Quaternary fossil bryophytes in North America: new records. *Lindbergia*. 9: 137-151

- Jensen, S. (1970), - Influences of transformation of cover values on classification and ordination of lake vegetation. *Vegetatio*. 37(1): 19-31
- Jensen, U. (1961), - Die Vegetation des Sonnenberger Moores im Oberharz und ihre ökologischen Bedingungen. *Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen (ed. Nieders. Landesverwaltungsamt)*. 1: 85 pp.
- Johansson, L.-G. & Linder, S. (1980), - Photosynthesis of Sphagnum in different microhabitats on a subarctic mire. *Ecol. Bull. (Stockholm)*. 30: 181-190
- Joray, M. (1942), - L'étang de la Gruère (Jura Bernois). Etude pollanalytique et stratigraphique de la tourbière. *Mat. Levé Géobot. Suisse*. 25: 117 pp.
- Jornod, G. (1992), - Observations météorologiques faites en 1991 à l'Observatoire cantonal de Neuchâtel. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.*, 115: 131-139
- Jortay, A. & Schumacker, R. (1989), - Zustand, Erhaltung und Regeneration der Hochmoore im Hohen Venn (Belgien). *Telma*. Beiheft 2: 279-293
- Julve, Ph. (1983), - Les groupements de prairies humides et de bas-marais: étude régionale et essai de synthèse à l'échelle de l'Europe occidentale. *Thèse. Univ. Paris Sud-Orsay*. : 224 pp.
- Kaila, A. (1956), - Determination of the degree of humification in peat samples. *Maatalous Achakaoushiya*. 28: 18-35
- Karsten, H. (1911), - Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit einiger Bodenarten. *Intern. Mitt. Bodenkundl.*, 1: ??
- Kästner, M. & Flössner, W. (1933), - Die Pflanzengesellschaften der erzgebirgischen Moore. *Veröff. Landesver. sächs. Heimatschutz*. 4: 206 pp.
- Kaule, G. (1974), - Die Übergangs- und Hochmoore Süddeutschlands und der Vogesen (Landschaftsökologische Untersuchungen mit besonderer Berücksichtigung der Ziele der Raumordnung und der Naturschutzes. *Dissertationes Botanicae*. 27: 345 pp.
- Kaule, G. (1976), - Voraussetzungen und Massnahmen zur Erhaltung geschützter und schützenswerter Moore. *Telma*. 6: 211-217
- Kivinen, E. (1977), - Survey, classification, ecology and conservation of peatlands. *Bull. Int. Peat Soc.* 8: 24-25
- Klötzli, F. (1969), - Die Grundwasserbeziehungen der Streu- und Moortwiesen im nördlichen Schweizer Mittelland. *Mat. Levé Géobot. Suisse*. 52: 296 pp.
- Kononova, M.M. (1966), - Soil organic matter. *Pergamon Press*. 2nd ed.
- Kuntze, H. (1965), - Physikalische Untersuchungsmethoden für Moor- und Anmoorboden. *Landwirtschaftl. Forsch.* 18: 178-191
- Kurimo, H. (1983), - Surface fluctuation in three virgin Pine mires in Eastern Finland. *Silva Fennica*. 17: 45-64
- Laine, J. (1984), - Estimation of evapotranspiration from peatlands by means of daily water table hydrographs. *Publ. Dept. Peatl. For. Univ. Helsinki*. 5: 1-100
- Laine, J. & Mannerkoski, H. (1975), - Tensiometrin käyttö turvemaiden kosteusolojen kuvauksessa. Résumé: On the use of tensiometers in describing moisture conditions in peat soils. *Suo*. 26(2): 17-24
- Landsberg, J.J. (1977), - Some useful equations for biological studies. *Expl. Agric.* 13: 273-286
- Lange, B. (1982), - Key to northern boreal and arctic species of Sphagnum, based on characteristics of the stem leaves. *Lindbergia*. 8: 1-29
- Langholz, H. (1989), - A simple model for predicting daily mean soil temperature. *J. Agronomy and Crop Science*. 163: 312-318

- Lang, R. (1915), - Versuch einer exakten Klassifikation der Böden in klimatischer und geologischer Hinsicht. *Intern. Mitt. d. Bodenkunde*. 5: 312-346
- Legendre, L. & Legendre, P. (1984), - Ecologie numérique I et II. *Ed. Masson, Paris*. I: 197 pp.; II: 254 pp.
- Leloup, E. & Jacquemart, S. (1963), - Ecologie d'une tourbière bombée (Haute-Ardenne, La Fange aux Mochettes). *Mém. Inst. Royal Sci. Nat. de Belgique*. 149: 159 pp.
- León, R. (1968), - Balance d'eau et d'azote dans les prairies à litière des alentours de Zürich. *Veröffent. Geobot. Institut. ETH, Stiftung Rübel, Zürich*. 41: 2-67
- Lepart, J. & Escarre, J. (1983), - La succession végétale, mécanisme et modèle: Analyse bibliographique. *Bull. Ecol.* 14(3): 133-178
- Lévesque, M.P. & Diné, H. (1977), - Fiber content, particle-size distribution and some related properties of four peat materials in eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.* 57: 187-195
- Lévesque, M.P. & Diné, H. (1982), - Some morphological and chemical aspects of peats applied to the characterization of histosols. *Soil Science*. 133(5): 324-332
- Lévesque, M.P. & Millette, J.A. (1977), - Description morphologique et aspects chimiques de la tourbière à Laïches de Farnham, Québec. *Naturaliste can.* 104: 511-526
- Lévesque, M.P., Diné, H. & Marcoux, R. (1980), - Evaluation des critères de différenciation pour la qualification de 92 matériaux tourbeux du Québec et de l'Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 60: 479-486
- Lévesque, M.P., Diné, H. & Larouche, A. (1988), - Guide illustré des macrofossiles végétaux des tourbières du Canada. *Agriculture Canada (1817)*: 65 pp.
- Lévesque, M.P., Diné, H., Morita, H., Schnitzer, M. & Mathur, S.P. (1981), - Les propriétés physiques, chimiques et morphologiques de quelques tourbes du Québec et de l'Ontario. *Inst. rech. sur les terres*. IRT 62: 74 pp.
- Lindholm, T. & Vasander, H. (1990), - Production of eight species of Sphagnum at Suurisuo mire, southern Finland. *Ann. Bot. Fennici*. 27: 145-157
- Lindsay, R.A. & collectif (1988), - The flow country. The peatlands of Caithness and Sutherland. *Nature Conservation Council*. : 174 pp.
- Lindsay, R.A., Riggall, J. & Burd, F. (1985), - The use of small-scale surface patterns in the classification of British peatlands. *Aquilo Ser. Bot.* 21: 69-79
- Lüdi, W. (1949), - Moore der Schweiz. IV. Kanton Bern (Gutachten aus den Jahren 1944-1949). *Schweiz. Bund für Naturschutz (1973)*. : 22 pp.
- Lüdi, W. (1951), - Moore der Schweiz. II. Kanton Neuenburg (Gutachten aus den Jahren 1943-1951). *Schweiz. Bund für Naturschutz (1973)*. : 10 pp.
- Lüdi, W. (1962), - Sümpfe und Moore in der Schweiz. *Schweizer Naturschutz*. 28: 62-67
- Luken, J.O. (1990), - Directing Ecological Succession. *Chapman and Hall*. : 251 pp.
- Lütt, S. (1992), - Produktionsbiologische Untersuchungen zur Sukzession der Torfstichvegetation in Schleswig-Holstein. *Mitt. der Arbeitsgemein. Geobot. in Schles.-Holstein u. Hamburg*. 43: 250 pp.
- Lynn, W., McKinzie, W.E. & Grossman, R.B. (1974), - Field laboratory tests for characterization of histosols. in A.R. Aandahl ed. *Histosols: Their characteristics, classification and use*. *Soil Sci. Soc. Amer. Spec. Publ.* 11-21 (6).
- Malmer, N. (1985), - Remarks to the classification of mires and mire vegetation. Scandinavian arguments. *Aquilo Ser. Bot.* 21: 9-17
- Malmer, N. (1988), - Patterns in the growth and the accumulation of inorganic constituents in the Sphagnum cover on ombrotrophic bogs in Scandinavia. *Oikos*. 53: 105-120

- Malmer, N. & Holm, E. (1984), - Variation in the C/N-quotient of peat in relation to decomposition rate and age determination with ^{210}Pb . *Oikos*. 43: 171-182
- Mannerkoski, H. (1985), - Effect of water table fluctuation on the ecology of peat soil. *Department of Peatland Forestry*. 7: 190 pp.
- Margalef, R. (1968), - Perspectives in ecological theory. *Univ. Chicago Press.* : 111 pp.
- Margalef, R. (1974), - *Ecologia*. Ed. Omega. Barcelona. : 951 pp.
- Margalef, R. (1979), - The organisation of space. *Oikos*. 33: 152-159
- Marthaler, H.P., Vogelsander, W., Richard, F & Wierenga, P.J. (1983), - A pressure transducer for field tensiometers. *Soil Science Soc. of Am. J.*. 47(4): 624-627
- Matthey, W. (1971), - Ecologie des insectes aquatiques d'une tourbière du Haut-Jura. *Rev. Suisse Zool.*. 78: 367-536
- Matthey, W. (1964), - Observations écologiques dans la tourbière du Cachot. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. Nat.*. 87: 105-135
- Matthey, W. (1965), - Signification de la butte à Sphaignes dans l'évolution de la haute tourbière. *C. R. Soc. Biogéogr.*. 371: 119-130
- Matthey, Y. (1986), - Etude phytosociologique du complexe de tourbières du Bois-des-Lattes. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. Nat.*. 109: 137-145
- Mattson, S. & Koutler-Anderson, E. (1954), - Geochemistry of a raised bog. *K. Lantbrukshögsk. Ann.*. 21: 321-366
- Mattson, S., Sandberg, G. & Terning, R.E. (1944), - Electrochemistry of soil formation VI: Atmospheric salts in relation to soil and peat composition. *K. Lantbrukshögsk. Ann.*. 12: 101-118
- Meyer, S. (1990), - Ein Verfahren zur Bewertung der Schutzwürdigkeit und Regenerationsfähigkeit nordwestdeutscher Hochmoore. *Telma*. 20: 273-290
- Miles, J. (1979), - Vegetation dynamics. *Chapmann and Hall, London*.
- Miles, J. (1987), - Vegetation succession: Past and present perceptions. in Gray, A.J., Crawley, M.J. & Edwards, P.J. (Ed.): *Colonization, succession and stability*. 1: 1-29
- Miouze, C. (1985), - Etude hydrologique et hydrogéologique du site expérimental de La Barthe. *D.E.A. Sciences de l'eau. Univ. Paris 6.* : 88 pp.
- Moore, P.D. (1977), - Stratigraphy and pollen analysis of Claish Moss, North-West Scotland: significance for the origin of surface-pools and forest history. *J. Ecol.*. 65: 375-397
- Mulhauser, G. (1989), - Contribution à l'écologie des milieux tourbeux secondaires et de leurs communautés d'arthropodes épipés. Vallée des Ponts-de-Martel, Jura neuchâtelois. *Trav. Licence. Univ. Neuchâtel.* : 58 pp.
- Mulhauser, G., Matthey, Y. & Grosvernier, P. (1992), - Typologie des milieux tourbeux de l'Arc jurassien. *Actes Soc. juras. d'Emulation*.
- Müller, K. (1980), - Versuche zur Regeneration von Hochmooren. *Telma*. 10: 197-204
- Murray, K.J., Tenhunen, J.D. & Kummerow, J. (1989), - Limitations of Sphagnum growth and net primary production in the foothills of the Philip Smith Mountains, Alaska. *Oecologia (Berlin)*. 80: 256-262
- Natura (1988), - Approche hydrologique des hauts-marais de Bellelay. *Inspection de la Protection de la Nature du canton de Berne.* : 31 pp.
- Nakache, J.-P. (1973), - Influence du codage des données en analyse factorielle des correspondances. Etude d'un exemple pratique médical. *Revue de statistique appliquée*. XXI(2): 57-70
- Nicolet, L. (1917), - Les tourbières de La Chaux-d'Abel et des Pontins. *Actes Soc. Juras. d'Emulation*. 21: 68-75

- Niemann, E. (1963), - Beziehungen zwischen Vegetation und Grundwasser. Ein Beitrag zur Präzisierung des ökologischen Zeigerwertes von Pflanzen und Pflanzengesellschaften. *Arch. Nat. Schutz Ldsch.forsch.* 3(1): 3-36
- Niemann, E. (1973), - Grundwasser und Vegetationsgefüge. *Nova Acta Leopoldina*. 38(2): 172 pp.
- Noble, I.R & Slatyer, R.O (1980), - The use of vital attributes to predict successional changes in plant communities subject to recurrent disturbances. *Vegetatio*. 43: 5-21
- Oberdorfer, E. (1977), - Süddeutsche Pflanzengesellschaften. Teil I. G. Fischer, Stuttgart. 311 pp.
- Odum, E.P. (1971), - Fundamentals of ecology. *W.B. Saunders Co.* : 639 pp. + XVI
- Odum, E.P. (1969), - The strategy of ecosystem development. *Science*. 164: 262-270
- Okruszko, H. (1980), - Klassifizierung von Feuchtgebieten auf der Grundlage der in ihnen entstehenden hydromorphen Bodensubstrate. *Telma*. 10: 17-24
- Orlói, L. & Kenkel, N. (1985), - Introduction to data analysis. *Int. Cooperative Publ. House.* : 339 pp.
- Overbeck, F. & Happach, H. (1957), - Ueber das Wachstum und den Wasserhaushalt einiger Hochmoorsphagnen. *Flora*. 144: 335-402
- Päivänen, J. (1973), - Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta Forestalia Fennica*. 129: 1-70
- Pnriat, I. (1988), - Les tourbières de Bellelay. Etude phytosociologique et pédologique. *Trav. Lic. Univ. Neuchâtel.* : 69 pp.
- Pedroli, J.-C. (1975), - La biologie du pipit farlouse (*Anthus pratensis* L.) dans le Jura suisse. *Trav. Lic. Univ. Neuchâtel.* : 72 pp.
- Pessi, Y. (1958), - On the influence of bog draining upon thermal conditions in the soil and in the air near the ground. *Acta Agriculturae Scandinavica*. 8(4): 359-374
- Pfadenhauer, J. (1989), - Renaturierung von Torfabbauflächen in Hochmooren des Alpenvorlands. *Telma*. Beiheft 2: 313-330
- Pickett, S.T., Collins, S.L. & Armesto, J.J. (1987), - A hierarchical consideration of causes and mechanisms of succession. *Vegetatio*. 69: 109-114
- Poschlod, P. (1988), - Vegetationsentwicklung ehemaliger Torfabbauggebiete in Hochmooren des bayerischen Alpenvorlandes. *Tuexenia*. 8: 31-53
- Poschlod, P. (1989), - Untersuchungen zur Diasporenbank der Bunkerde am Beispiel der Kollerfilze (Rosenheimer Becken; Alpentorfwerke Raubling). *Telma*. Beiheft 2: 295-311
- Poschlod, P & Pfadenhauer, J. (1989), - Regeneration vegetativer Sprosssteilchen von Torfmoosen. - Eine vergleichende Studie an neuen Sphagnum-Arten. *Telma*. 19: 77-88
- Proctor, M.C.F. (1982), - Physiological Ecology: Water relations, light and temperature responses, carbon balance. *Bryophyte Ecology* (ed. A.J.E. Smith). 10: 333-381
- Prozorova, M. I. (1988), - Influence of moisture and temperature on the mineralization rate of peat. *Soviet J. of Ecol.* 19(2): 69-72
- Prytz, K. (1932), - Der Kreislauf des Wassers auf unberührtem Hochmoor. *Ingeniörvidensk. Skr. Ser. A*. 33: 1-126
- Rafidison, Z. (1982), - Thèse CPB /CNRS. *Univ. Nancy*.
- Renger, M. Bartels, R. Strebel, O. & Giesel, W. (1976), - Kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser und Infiltration bei Moorböden. *Geologisches Jb.* 3: 9-51
- Richard, J.L. (1961), - Les forêts acidophiles du Jura. Etude phytosociologique et écologique. *Mat. Levé Géobot. Suisse*. 38: 164 pp.

- Ringler, A. (1989), - Zur Naturschutzbedeutung aufgeschlossener Torfabbauf Flächen im Alpenvorland: Beobachtungen zur Flächenrelevanz, Vegetationsentwicklung und floristischen Bedeutung. *Telma*. Beiheft 2: 331-363
- Robert, J. (1990), - Contribution à l'étude faunistique et écologique de l'entomofaune des tourbières bombées du Haut-Jura (Bellclay, Jura bernois). *Trav. Lic. Univ. Neuchâtel.* : 317 pp.
- Royer, J.M., Gallandat, J.D., Gillet, F. & Vadam, J.C. (1979), - Sur la présence de groupements relictuels d'affinités boréoarctiques au niveau des marais tremblants (Scheuchzerietalia) du Jura Franco-Suisse. *Doc. Phyto.* 4: 1081-1092, 1 tab
- Royer, J.M., Vadam, J.C., Gillet, F. & Aumonier, M.F. (1978), - Etude phytosociologique des tourbières acides et alcalines du Haut-Doubs. Réflexions sur leur régénération et leur genèse. *Centre Univ. Etudes Région. Besancon.* 2: 109-185
- Rybnicek, K. (1985), - A Central-European approach to the classification of mire vegetation. *Aquilo Ser. Bot.* 21: 19-31
- Rycroft, D.W., Williams, D.J.A. & Ingram, H.A.P. (1975a), - The transmission of water through peat. I. Review. *J. Ecol.* 63: 535-556
- Rycroft, D.W., Williams, D.J.A. & Ingram, H.A.P. (1975b), - The transmission of water through peat. II. Field experiments. *J. Ecol.* 63: 557-568
- Rydén, B.E. & Kostov, L. (1980), - Thawing and freezing in tundra soils. *Ecol. Bull. (Stockholm)*. 30: 251-281
- Rydin, H. (1984), - Some factors affecting temperature in Sphagnum vegetation. An experimental analysis.. *Cryptogamie. Bryol. Lichénol.* 5(4): 361-372
- Rydin, H. (1985), - Effect of water level on desiccation of Sphagnum in relation to surrounding Sphagna. *Oikos*. 45: 374-379
- Rydin, H. (1986), - Competition and niche separation in Sphagnum. *Can. J. Bot.* 64: 1817-1824
- Sahl (von der), T.W. (1975), - Versuch der Regeneration einer teilweise ausgetorften Pütte im "Grossen Moor" bei Gifhorn. *Telma* 5: 341-344
- Schmatzler, E. & Tüxen, J. (1980), - Wiedervernässung und Regeneration von niedersächsischen Hochmooren in ihrer Bedeutung für den Naturschutz. *Telma*. 10: 159-171
- Schmeidl, H. (1964), - Bodentemperaturen in Hochmoorböden. *Sonderd. aus Bayeris. Landwirtschaft. Jahrbuch.* 41(1): 115-122
- Schmeidl, H. (1978), - Ein Beitrag zum Mikoklima der Hochmoore. *Telma*. 8: 83-105
- Schneebeli, M. (1988), - Die Regeneration des Hochmoores Turbenriet - Gamperfin, Gemeinde Grabs SG. *Ber. Bot.-Zool. Ges. Liechtenstein-Sargans-Werdenberg.* 17: 101-223
- Schneebeli, M. (1989), - Zusammenhänge zwischen Moornachstum und hydraulischer Durchlässigkeit und ihre Anwendung auf den Regenerationsprozess. *Telma*. Beiheft 2: 257-264
- Schneebeli, M. (1991), - Hydrologie und Dynamik der Hochmoorentwicklung. *Diss. ETH.* 9366: 133 pp.
- Schneebeli, M. & Pfeiffer, M. (1983), - Untersuchungen und Vorschläge zur Hochmoorregeneration im Forresmoos. *Trav. de diplôme non publié. Inst. für Kulturtech., ETH. Zürich.* 8
- Schnitzer, M. (1978), - Soil organic matter. in *Schnitzer, M. & Khan, S.U. (ed.), Elsevier. Developpements in Soil Science.* 8: 1-64
- Schnitzer, M. (1982), - Organic matter characterisation. *Methods of Soil Analysis (ed. SSSA). Part 2: Chemical and Microbiological Properties - Agronomy Monograph.* 9: 581-594
- Schnitzer, M. (1986), - Water retention by humic substances. in *Fuchsmann, C.H. ed: Peat and Water.* 9: 159-176

- Schnitzer, M. & Lévesque, M. P. (1979), - Electron spin resonance as a guide to the degree of humification of peats. *Soil Science*. 123 (3): 140-145
- Shannon, C.E. (1948), - A mathematical theory of communications. *Bell. Sys. Tech. J.* 27: 379-423, 623-656
- Siegel, D.I. & Glaser, P.H. (1987), - Groundwater flow in a bog-fen complex, Lost River peatland, northern Minnesota. *J. Ecol.* 75: 743-754
- Silvola, J. & Aaltonen, H. (1984), - Water content and photosynthesis in the peat mosses *Sphagnum fuscum* and *S. angustifolium*. *Ann. Bot. Fennici*. 21: 1-6
- Sjörs, H. (1979), - An "ordination" of changes, with examples from successions in boreal peatland. *Advances in vegetation sciences*. : 5 pp.
- Smith, A.J.E. (1980), - The moss flora of Britain and Ireland. *Cambridge Univ. Press*. : 706 pp.
- Soutter, M. & Musy, A. (1991), - Physique du sol. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, coll. *Gérer l'environnement*. 6: 335 pp.
- Spinner, H. (1927), - Le climat de la Vallée de La Brévine. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 51: 20-52
- Spinner, H. (1932), - Le Haut-Jura neuchâtelois nord-occidental. *Mat. Levé Géobot. Suisse*. 17: 197 pp.
- SSSA (1974), - Histosols. *SSSA, special publication series, Madison, USA*.
- Steiner, G.M. (1985), - The hydrological mire types of Austria and their vegetation. *Aquilo Ser. Bot.* 21: 53-60
- Svensson, G. (1988), - Fossil plant communities and regeneration patterns on raised bog in South Sweden. *J. Ecol.* 76: 41-59
- Tallis, J.H. (1983), - Changes in wetland communities. *Mires: Swamp, bog, fen and moor, a general study* (ed. A.J.P. Gore). 4a: 311-348
- Tansley, A.G. (1939), - The British islands and their vegetation. *London, Cambridge Univ. Press*.
- Tinbergen, L. (1940), - Observation sur l'évaporation de la végétation d'une tourbière des Hautes-Fagnes de Belgique. *Mém. Soc. R. Sci. nat. Liège. Série 4 (IV)*, 1: ??
- Topp, G.C. & Zebchuk, W. (1979), - The determination of soil-water desorption curves for soil cores. *Can. J. Soil Sci.* 59: 19-26
- Touffet, J. (1969), - Les sphaignes du Massif Armoricaïn. Recherches phytogéographiques et écologique. *Thèse, Univ. Renne. Non publié*. : 357 pp.
- Tutin, T.G. (éd.) et al. (1964-1980), - Flora Europaea. *Cambridge Univ. Press*. 5 vol.:
- Tüxen, J. (1974), - Das Sehestedter Aussebeichsmoor - ein regenerierendes Hochmoor. *Telma*. 4: 119-128
- Tüxen, J. (1976), - Ueber die Regeneration von Hochmooren. *Telma*. 6: 219-230
- Tüxen, J. (1979), - Vorschlag einer typologischen Ordnung der Niedersächsischen Hochmoore - Vorläufige Mitteilung. *Telma*. 9: 15-29
- Uhden, O. (1967), - Niederschlags- und Abflussbeobachtungen auf unberührten, vorentwässerten und kultivierten Teilen eines nordwestdeutschen Hochmoores, der Esterveger Dose am Küstenkanal bei Papenburg. *Schriftenr. Kurat. Kult., Hamburg*. 15(1): 1-99
- Van der Maarel, E. (1979), - Transformation of cover-abundance values in phytosociology and its effects on community similarity. *Vegetatio*. 39(2): 97-111
- Wagner, J. & Titus, J.E. (1984), - Comparative dessication tolerance of two *Sphagnum* mosses. *Oecologia (Berlin)*. 62: 182-187

- Walker, D. (1970), - Direction and rate in some British post-glacial hydroscrees.
in: *Studies in the vegetational history of the British Isles* (ed. D. Walker & R.G. West). : 117-139
- Wallén, B., Falkengren-Grerup, U. & Malmer, N. (1988), - Biomass, productivity and relative rate of photosynthesis of *Sphagnum* at different water levels on a South Swedish peat bog.
Holarctic Ecology. 11: 70-76
- Waughman, G.J. (1980), - Chemical aspects of the ecology of some South German Peatlands.
J. Ecol. 68: 1025-1046
- Wells, D.E. & Zoltai, S. (1985), - The Canadian system of wetland classification and its application to circumboreal wetlands. *Aquilo Ser. Bot.* 21: 42-52
- White, J.M. (1930), - Re-colonisation after peat-cutting. *Royal Irish Academy Proceedings*. XXXIX, sect. B: 453-476
- White, P.S. (1979), - Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *Bot. Rev.* 45: 229-299
- Wicky, J.-D. (1988), - Die Torfmoore von Rechthalten und St. Ursen / Kanton Freiburg.
Gnägi's Druck-Egge, Bern. : 226 pp.
- Wildi, O. (1986), - Analyse vegetationskundlicher Daten. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich*, 90: 226 pp.
- Wildi, O. & Orlóci, L. (1990), - Numerical exploration of community patterns.
SPB Academic Publishing bv. : 124 pp.
- Williams, G.P. (1968), - The thermal regime of a *Sphagnum* peat-bog.
Proc. 3rd Int. Peat Congress. Québec. : 195-200
- Yerly, M. (1970), - Ecologie comparée des prairies marécageuses dans les Préalpes de la Suisse occidentale. *Thèse EPFZ.* : 119 pp.
- Zoltai, S.C. & Pollett, F.C. (1983), - Wetlands in Canada: Their classification, distribution and use.
Mires: Swamp, bog, fen and moor: a regional studies (ed A.J.P. Gore). 4b: 245-268
- Zoltai, S.C., Pollett, F.C., Jeglum, J.K. & Adams, G.D. (1973), - Developing a wetland classification for Canada. *Proc. 4th North. Amer. Soils Conf.* 497-511.

LISTE DES FIGURES

page

Figure 1	Zone géographique prospectée par la typologie à travers l'Arc jurassien	8
Figure 2	Définition des termes utilisés pour la typologie	10
Figure 3	Organisation des classes de descripteurs pour les trois catégories	14
Figure 4	Exemple d'application de la fiche typologique	16
Figure 5	Fréquence des types, des stations et des surfaces par catégories	22
Figure 6	Relation nombre de stations / nombre de types dans les 16 tourbières ayant de la régénération	23
Figure 7	Répartition comparative de la variabilité propre à chaque descripteur pour stations et surfaces	26
Figure 8	Analyse multivariable avec codification 0-3 pour la catégorie des mosaïques	28
Figure 9	Analyse factorielle des correspondances avec caractères binaires, catégorie des mosaïques	30
Figure 10	Analyse multivariable avec codification 0-3 pour la catégorie des tapis continus	32
Figure 11	Analyse factorielle des correspondances avec caractères binaires, catégorie des tapis continus	33
Figure 12	Analyse multivariable avec codification 0-3 pour la catégorie des creuses	34
Figure 13	Analyse factorielle des correspondances avec caractères binaires, catégorie des creuses	36
Figure 14	Evolution dynamique des deux séries dynamiques terrestres	41
Figure 15	Evolution dynamique des groupements dans les creuses	45
Figure 16	Organigramme du travail de terrain avec déroulement temporel	52
Figure 17	Figuration des mode d'échantillonnage de la végétation	56
Figure 18	Organigramme des analyses sur les sols	60
Figure 19	Installation de terrain: Piézomètres et tensionnètres	66
Figure 20	Présentation schématique des appareils de mesures micrométéorologiques	70
Figure 21	Localisation géographique des 5 tourbières des séries évolutives à travers l'Arc jurassien	80
Figure 22	Localisation géographique du site des Pontins	82
Figure 23	Localisation géographique du site de La Chaux-d'Abel	82
Figure 24	Localisation géographique du site de Martel-Dernier	84
Figure 25	Localisation géographique du site du Cachot	86
Figure 26	Localisation géographique du site de Bellelay	88
Figure 27	Répartition proportionnelle des espèces végétales le long des profils. Série des touradons	90
Figure 28	Projection plane de la répartition des espèces végétales. Série des touradons	92
Figure 29	Répartition proportionnelle des espèces végétales le long des profils. Série des gazons de mousses	94
Figure 30	Projection plane de la répartition des espèces végétales. Série des gazons de mousses	96
Figure 31	Répartition proportionnelle des espèces végétales le long des profils. Série des marais tremblants	98
Figure 32	Projection plane de la répartition des espèces végétales. Série des marais tremblants	100
Figure 33	Transect de végétation, série des marais tremblants, stades 1 et 2	104
Figure 34	Transect de végétation, série des marais tremblants, stade 3	108
Figure 35	Transect de végétation, série des marais tremblants, stade 4	112
Figure 35 bis	Dynamique de la recolonisation végétale en relation avec les fosses d'exploitation	114
Figure 36	Profil du sol, stade 1, série des touradons	122
Figure 37	Profil du sol, stade 2, série des touradons	126
Figure 38	Profil du sol, stade 3, série des touradons	130
Figure 39	Profil du sol, stade 4, série des touradons	134
Figure 40	Profil du sol, stade 1, série des gazons de mousses	138
Figure 41	Profil du sol, stade 2, série des gazons de mousses	142
Figure 42	Profil du sol, stade 3, série des gazons de mousses	146
Figure 43	Profil du sol, stade 4, série des gazons de mousses	150
Figure 44	Profil du sol, stade 1, série des marais tremblants	154
Figure 45	Profil du sol, stade 2, série des marais tremblants	158
Figure 46	Profil du sol, stade 3, série des marais tremblants	162
Figure 47	Profil du sol, stade 4, série des marais tremblants	164
Figure 48	Stratigraphie du transect 1, Bellelay, stade 1 et 2 des marais tremblants	168
Figure 49	Stratigraphie du transect 2, Bellelay, stade 3 des marais tremblants	170
Figure 50	Stratigraphie du transect 3, Bellelay, stade 4 des marais tremblants	172
Figure 51	Le triangle granulométrique organique	178
Figure 52	Classification granulométrique de la série des touradons	178
Figure 53	Classification granulométrique de la série des gazons de mousses	180
Figure 54	Classification granulométrique de la série des marais tremblants	180
Figure 55	Classification des horizons selon les variables "fibres et pyro"	184
Figure 56	Schéma du déroulement des analyses multivariables des sols	198
Figure 57	ACP globale des sols	200
Figure 58	ACP partielle, 5 paramètres classiques	204
Figure 59	ACP partielle, 15 horizons avec porosité	206
Figure 60	Variations saisonnières de la nappe, série des touradons: Dans le touradon	216
Figure 61	Variations saisonnières de la nappe, série des touradons: Tourbe nue entre les touradons	216
Figure 62	Courbes de dépassement permanent des piézomètres, série des touradons	218
Figure 63	Variations saisonnières des siccions, série des touradons: stade 2	220
Figure 64	Variations saisonnières des succions, série des touradons: stade 3	220
Figure 65	Variations saisonnières des succions, série des touradons: stade 4	220
Figure 66	Courbes de dépassement permanent des tensionnètres: série des touradons	222

Figure 67	Variations saisonnières de la nappe, série des gazons muscinaux: stades 2, 3 et 4	224
Figure 68	Courbes de dépassement permanent des piézomètres, série des gazons muscinaux	224
Figure 69	Variations saisonnières des succions, série des gazons muscinaux: stade 2	226
Figure 70	Variations saisonnières des succions, série des gazons muscinaux: stade 3	226
Figure 71	Variations saisonnières des succions, série des gazons muscinaux: stade 4	226
Figure 72	Courbes de dépassement permanent des tensiomètres: série des gazons de mousses	228
Figure 73	Variations saisonnières de la nappe, série des marais tremblants: stades 1, 2 et 3	230
Figure 74	Variations saisonnières de la nappe, série des marais tremblants: stade 4	230
Figure 75	Courbes de dépassement permanent des piézomètres, série des marais tremblants	232
Figure 76	Variations saisonnières des succions, série des marais tremblants, stade 3	234
Figure 77	Variations saisonnières des succions, série des marais tremblants, stade 4	234
Figure 78	Courbes de dépassement permanent des tensiomètres, série des marais tremblants	236
Figure 79	Diagramme ombrothermique moyen, La Brévine	240
Figure 80	Diagramme ombrothermique 1991, La Brévine	240
Figure 81	Diagramme ombrothermique du premier semestre 1992, La Brévine	240
Figure 82	Climatogramme comparatif entre climat moyen et données 1991 et 1992	242
Figure 83	Pluviométrie quotidienne à La Brévine en 1991	242
Figure 84	Profils thermiques et fluctuations nycthémerales: Comparaison estivale de trois situations types	250
Figure 85	Profils thermiques et fluctuations nycthémerales: Comparaison saisonnière pour la tourbe nue	252
Figure 86	Déterminisme du rôle climatique des touradons par les profils thermiques	260
Figure 87	Déterminisme du rôle climatique des gazons de mousses par les profils thermiques	264
Figure 88	Déterminisme du rôle climatique des structures ligneuses par les profils thermiques	268
Figure 89	Productivité de <i>Sphagnum recurvum in situ</i> , en 1992	280
Figure 90	Convergence de la productivité des deux séries évolutives analysées	285
Figure 91	Relations spatio-temporelles induites par l'exploitation de la tourbe et la régénération	296
Figure 92	Description synthétique des trois successions décrites	308

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Typologie: Liste des types et des surfaces pour la catégorie des creuses
Annexe 2	Typologie: Liste des types et des surfaces pour la catégorie des mosaïques
Annexe 3	Typologie: Liste des types et des surfaces pour la catégorie des tapis continus
Annexe 4	Mode opératoire de la CEC pour les sols organiques
Annexe 5	Mode opératoire pour la table à tension, selon BUTTLER
Annexe 6	Résultats détaillés des analyses de macrorestes végétaux des tourbes
Annexe 7	Organisation spatiale des sites de recherches des trois séries évolutives (c.f. planches 1, 2 et 3)

!!!! Le tableau 2 est manquant !!!!

Tableau 1	Présentation des sites inventoriés du Jura suisse	12
Tableau 3	Codification par décomposition des descripteurs en caractères binaires pour ANAFAC	18
Tableau 4	Statistiques générales par tourbières	20
Tableau 5	Statistiques générales sur les types recensés et les surfaces	22
Tableau 6	Résultats détaillés par critères et catégories pour les descripteurs communs aux trois catégories	24
Tableau 7	Résultats de l'analyse des transect de végétation. Série des marais tremblants, stades 1 et 2	102
Tableau 8	Résultats de l'analyse des transect de végétation. Série des marais tremblants, stade 3	106
Tableau 9	Résultats de l'analyse des transect de végétation. Série des marais tremblants, stade 4	110
Tableau 10	Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 1	124
Tableau 11	Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 2	128
Tableau 12	Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 3	132
Tableau 13	Résultats des analyses de sol, série des touradons, stade 4	136
Tableau 14	Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 1	140
Tableau 15	Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 2	144
Tableau 16	Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 3	148
Tableau 17	Résultats des analyses de sol, série des gazons de mousses, stade 4	152
Tableau 18	Résultats des analyses de sol, série des marais tremblants, stade 1	156
Tableau 19	Résultats des analyses de sol, série des marais tremblants, stade 2	160
Tableau 20	Résultats des analyses de sol, série des marais tremblants, stade 3	163
Tableau 21	Résultats des analyses de sol, série des marais tremblants, stade 4	166
Tableau 22	Valeurs limites des classes granulométriques	179
Tableau 23	Corrélations linéaires entre tous les paramètres et tous les horizons	190
Tableau 24	Corrélations linéaires pour la série des touradons	192
Tableau 25	Corrélations linéaires pour la série des gazons de mousses	194
Tableau 26	Corrélations linéaires pour la série des marais tremblants	196
Tableau 27	Données météorologiques générales pour La Brévine en 1991 et 1992	238
Tableau 28	Résultats microclimatiques de trois situations principales des séries	248
Tableau 29	Valeurs thermiques comparatives pour différents milieux	254
Tableau 30	Résultats de l'influence microclimatique des touradons	256
Tableau 31	Résultats de l'influence microclimatique des gazons de mousses	262
Tableau 32	Résultats de l'influence microclimatique des bordures chaméphytiques des fosses	266
Tableau 33	Synthèse des résultats microclimatiques principaux	270
Tableau 34	Résultats généraux des mesures de croissance	280
Tableau 35	Croissance de <i>Sphagnum recurvum</i> . Comparaison des stades 2 et 4	281
Tableau 36	Modèle tabulaire de la succession écologique: tendance des trois séries évolutives	298

ANNEXES

Liste des types et surfaces recensés pour la catégorie des mosaïques

Nombre de station	types de régénération	surfaces cumulées en m2
1	AAABBACA	120
2	AABBAACA	240
2	AACBABBA	275
6	AADAAABA	152
1	AADAAACA	18 750
1	AADBBACA	30
1	AAEABACA	2 500
1	AAEBAABA	200
8	AAEBAACA	79 040
2	AAEBBAAA	390
1	AAEBBACA	105
2	AAFBAABA	180
1	AAFBAACA	180
2	AAFBBACA	83
1	ABAAABCA	1 200
5	ABABAABA	656
1	ABBAAACA	1 000
1	ABBBAACB	3 000
1	ABCBABCA	6 000
4	ABDAAACA	153 600
1	ABDABABA	150
1	ABDABACA	3 500
1	ABEAAACA	30
1	ABEBAACA	1 200
1	ABEBBACA	600
1	ABFBAACA	240
2	BAABBACA	30
2	BACBBACA	75
2	BAEBABCA	40
1	BAEBBACA	800
2	BBABBACA	1 580
1	BBBBBACA	160
1	BBDAAACA	1 050
1	BBDBABAA	2 000
1	BBFBBACA	160
4	CADAAACA	16 800
1	CAEBAACA	60 000
1	CAEBABCA	20
1	CBABAABB	2 000
2	CBABAACA	100
1	CBABBACA	400
3	CBCBBABA	1 100
2	CBDAAACA	15 600
1	CBDBBACA	11 000
1	CEBBBABA	1 200
1	CBFBAACA	2 500
81		390 036

Liste des types et surfaces recensés pour la catégorie des tapis continus

Nombre de station	types de régénération	surfaces cumulées en m2
2	AAAABA	90
27	AAAACA	22 034
1	AAAACB	60
9	AAABCA	1 530
5	AABACA	227
1	ABAAAA	56
4	ABAABA	1 360
28	ABAACA	41 155
2	ABAACB	276
3	ABABBA	800
15	ABABCA	25 080
2	ABABCB	350
3	ABBABA	38
12	ABBACA	3 956
2	ABBACB	10 600
1	ABBBCA	2
1	ABBBCB	40
4	BAAACA	3 150
6	BBAACA	9 960
1	BBABCA	100
1	BBBAAA	2 000
1	BBBABA	1 000
3	BBBACA	1 930
8	CAAACA	38 334
1	CBAAAA	50
2	CBAABA	3 000
3	CBAACA	3 000
1	CBABCA	1 600
1	CBBAAB	1 000
1	CBBACA	8
151		172 786

Liste des types et surfaces recensés pour la catégorie des creuses

Nombre de station	types de régénération	surfaces cumulées en m ²
1	AAAAAAB	200
2	AAAACAA	2 635
1	AAAACAB	40
2	AAABCAB	6 150
3	ABAABAA	1 621
1	ABAABBA	800
8	ABAACAA	2 977
2	ABAACAB	2 800
1	ABAACBA	15
4	ABABAAA	138
1	ABABAAB	210
4	ABABBAA	79
2	ABABBAB	860
11	ABABCAA	8 955
4	ABABCAB	2 990
18	ABABCBA	3 837
4	ABABCBB	2 924
1	ABACBBB	200
3	ABACCBA	1 240
2	ABACCCA	30
4	ABBABAA	2 532
2	ABBACAA	30
4	ABBACAB	2 794
4	ABBACBA	660
2	ABBBBBA	14
2	ABBBCAA	78
10	ABBBBCBA	1 057
1	ABBBCCA	20
1	ABBBCCBA	350
7	ABBBCCA	6 100
1	ABBBCCB	225
1	BAAACAA	14
1	BAABCBA	600
2	BBAAAAA	1 300
2	BBAACAA	312
3	BBAACBA	1 200
1	BBAACBB	200
1	BBABCAA	200
1	BBABCAB	600
1	BBABCBA	300
1	BBACCCA	200
4	BBBACBA	279
1	BBBBCBA	18
1	CBAACAA	14
1	CBABCBA	600
1	CBBAAAA	140
1	CBBABAA	5
1	CBBCCBA	6
137		58 549

Annexe 4: Mode opératoire de la CEC adaptée aux sols organiques

1. Application

Cette méthode est celle mise au point par l'AOAC canadienne (Association of Official Agricultural Chemists) pour les sols organiques. Selon l'AOAC, elle donne des valeurs un peu plus haute que la méthode à l'acétate d'ammoniaque.

2. Matériel

Flacon de 250 ml
Agitateur rotatif
Papiers filtres
Bécher de 500 ml pour contenir le lavage final
Grand entonnoir

3. Réactifs

HCl 0.5 N
Ba(OAc)₂ 0.5 N (63.86 g/l)
Ag NO₃ 1% (1g/100 ml)
NaOH 0.1 N (4 g/l)

Solution de Potassium phthalate acide (4.0846 g/ 200 ml). Deshydrater la poudre à 120°C.
Indicateur à la Phénolphtaléine (1 g/100 ml d'alcool éthylique à 95%)

4. Mode opératoire

Peser 0.5 g de tourbe sèche coupée à 2 mm dans un flacon de 250 ml.

Ajouter 50 ml d'HCl 0.5 N et mettre à l'agitateur pendant 30 minutes.

Filtrer et laver avec des portions de 100 ml d'eau bidistillée jusqu'à ce que 10 ml d'eau de lavage ne précipite pas avec 3 ml d'Ag NO₃ 1%.

Eliminer l'eau de lavage.

Transférer immédiatement l'échantillon dans un flacon de 250 ml en coupant le papier filtre et ajouter 100 ml de Ba(OAc)₂.

Agiter pendant 15 minutes

Filtrer et laver avec trois portions succesives d'eau bidistillée. Conserver l'eau de lavage pour la titration.

5. Titration

Titrer la solution additionnée de quelques gouttes de Phénolphtaléine avec NaOH 0.1N jusqu'au premier virage rose.

6. Calculs

$$\text{CEC m\acute{e}q/100g} = \frac{\text{ml} * \text{Normalit\acute{e} de NaOH} * 100}{\text{poids de l'\acute{e}chantillon}}$$

POROSITES, CAPACITE DE RETENTION EN EAU ET DENSITE APPARENTE D'UN SOL:

MESURE DE LA RETENTION EN EAU D'UN SOL AVEC LA TABLE A TENSION

1. Introduction

La quantité et la taille des pores dans le sol constituent une propriété écologique importante en rapport direct avec l'aération (diffusion de l'oxygène et du gaz carbonique: croissance racinaire et développement des microorganismes), la circulation de l'eau dans le sol (drainage, conductivité hydraulique en milieu saturé ou non saturé), la disponibilité en eau (capacité de rétention, eau utile pour les plantes) et la température (pénétration de la chaleur dans le sol: activité biologique, productivité).

La porosité du sol étant formée de vides de tailles variées, l'eau qui y pénètre peut circuler librement dans les pores de grandes dimensions et au contraire être plus ou moins fortement retenue dans les pores les plus fins où les forces de tension superficielle deviennent prépondérantes. L'eau contenue dans un sol est donc caractérisée par son volume (teneur en eau du sol) et par son état énergétique (potentiel de l'eau du sol).

La mesure de la capacité de rétention en eau d'un échantillon de sol non remanié saturé en eau puis soumis à différentes tensions hydrostatiques (succions) permet de calculer la distribution des pores suivant leurs dimensions. La méthode de la table à tension telle qu'elle est décrite ici (matrice de billes de verre d'un diamètre médian entre 27 et 36 microns), et dont le principe est analogue à celui, plus souvent mentionné dans la littérature, de l'extracteur à plaque poreuse, permet de mesurer le volume des pores de la taille des macropores aux mésopores moyens. Le principe est comparable, mais inverse, à celui d'un tensiomètre: on "suspend" une colonne d'eau à l'échantillon pour vider les pores, selon différentes forces de succion. La matrice agit comme la bougie céramique du tensiomètre: l'eau passe dans la matrice poreuse composée de fines billes de verre, mais pas l'air (la capacité de pénétration de l'air dépend en fait de la granulométrie de la matrice et de la force de succion).

1.1 Porosité et teneur en eau du sol

La morphologie de l'espace poral se répartit en deux grands ensembles:

- 1) La porosité minimale ou porosité texturale: c'est la porosité provenant de l'assemblage des particules (compactées).
- 2) La porosité structurale: c'est la porosité provenant de la "fissuration" du sol. Elle comprend des pores de tailles plus grandes et plus variables. C'est par eux que se font en principe les échanges de fluides dans le sol, car ils forment un réseau continu.

On parle aussi de porosité effective pour l'ensemble des pores communicants, par opposition aux pores occlus qui forment la porosité résiduelle.

A la suite de travaux en micromorphologie on tend à répartir la porosité effective totale en 4 classes qui correspondent à des fonctions différentes dans le sol.

1) La **macroporosité**: pores les plus gros (> 0,2 mm) dans lesquels l'eau circule librement sous l'effet de la gravité. Elle résulte de l'activité biologique et de la fissuration du sol (structuration liée aux phénomènes de dessiccation/gonflement) et permet les échanges gazeux (O₂, CO₂).

On distingue les macropores > 2mm, accessibles aux vers de terre notamment, et ceux entre 2 et 0,2 mm, résultant souvent d'anciennes racelles.

2) La **mésoporosité**: pores compris entre 0,2 mm et 6 microns. Dans les gros mésopores (0,2 mm à 60 microns), le drainage de l'eau est rapide, dans les mésopores moyens (60 à 20 microns) il est lent, et dans les mésopores fins (20 à 6 microns) il est très faible.

A la capacité au champ on considère que les pores se vident de leur eau jusqu'à une taille correspondant aux mésopores moyens.

3) la **microporosité** ou **porosité capillaire**: pores compris entre 6 et 0,2 microns. C'est elle qui renferme l'essentiel de l'eau utilisable par les plantes.

4) La **porosité matricielle**: pores très fins de dimensions inférieures à 0,2 microns. Ils contiennent de l'eau difficilement exploitable par les racines.

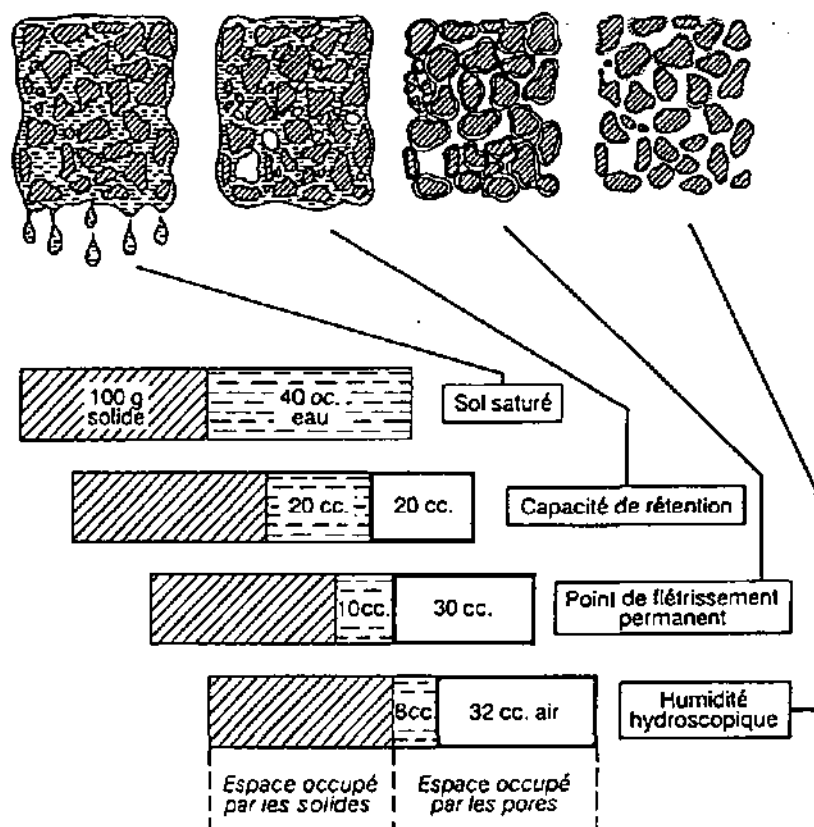
La porosité d'un sol est liée également à sa densité apparente. En particulier, la macroporosité diminue au profit de la microporosité quand la densité apparente augmente, par exemple sous l'effet du tassement. Selon le type de sol, la porosité totale (ou même la répartition des pores) peut varier naturellement dans le temps, en fonction du climat (p. ex. saturation puis gonflement d'une tourbe sous l'effet de l'eau de pluie), du pédoclimat (assèchement estival d'un sol hydromorphe qui favorise l'activité biologique et la formation d'un hydromull à partir d'un anmoor) et du couvert végétal (activité racinaire). Des discontinuités verticales peuvent aussi apparaître et influencer la circulation de l'eau (p. ex. lessivage d'argiles et formation d'un pseudogley secondaire).

La porosité ne doit pas seulement être jugée en volume ou en répartition des pores (dimensions). Il faut aussi tenir compte de la continuité des vides. Celle-ci est assurée par les agents biologiques (brassage par les vers, racines), par les fissures et par le caractère coalescent des vides. En réalité, seule une faible partie des pores sert au transfert de l'eau.

Quelques grandeurs pour la porosité des sols:

Type de sol/culture	Densité apparente g/cm ³	Porosité totale % du volume de sol	Macroporosité % du volume de sol	Mésoporosité % du volume de sol	Microporosité et porosité matricielle % du volume de sol
Sol minéral moyen	1,9 à 0,8	30 à 50	10 à 30		
Tourbe fibrique	0,04	97	25	48	24
Tourbe mésique	0,17	90	8	32	50
Tourbe humique	0,23	85	3	23	59

L'occupation des pores par l'air et l'eau (CHAMAYOU et LEGROS 1989):



Exemple de répartition de la porosité dans différents sols à texture hétérogène (CHAMAYOU et LEGROS 1989):

	MATERIAU / SOL			
	Sable limoneux	Limon	Argile	
Teneur en argile en %	10	20-40	40	
Dimension des pores en microns	Volume des pores en pourcentage du volume total			Force de succion approximative de l'eau en bars
>300	1	5	2	0,01
96-300	3	1	0,5	0,03
60-96	5	1	0,5	0,05
30-60	7	4	1	0,1
6-30	14	9	7	0,5
0,2-6	1	20	22	15
< 0,2	14	10	22	15
Total de l'espace poral en %	45	50	55	

1.2 Le potentiel de l'eau du sol

Dans un sol, l'eau est soumise à 3 forces principales lui donnant les énergies potentielles suivantes: le potentiel de pression (hydrostatique + matricielle), le potentiel gravitaire et le potentiel chimique (essentiellement osmotique).

Si l'on considère uniquement l'eau retenue par le sol et que l'on suppose ce sol indéformable et soumis seulement à la pression atmosphérique extérieure, le nombre de composantes du potentiel se réduit à deux qui sont, par ordre d'importance, le potentiel capillaire et le potentiel osmotique. En effet, l'eau de rétention du sol est soumise à des forces de tension superficielle (potentiel capillaire ou de pression matricielle) qui sont bien souvent très supérieures aux forces de gravité. Aussi, lorsque la plante doit extraire l'eau du sol, elle fournit un travail destiné à vaincre essentiellement les forces de tension superficielle.

La loi de Laplace et celle de Jurin, qui expliquent respectivement les phénomènes de la formation du "ménisque" dans un tube capillaire et la remontée capillaire, s'appliquent aux pores du sol et permettent de mettre en relation, pour un échantillon préalablement saturé en eau, la dimension des pores et la succion du sol.

$$h = \frac{2 \gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

h = hauteur de la colonne d'eau en cm (ascension capillaire ou succion de l'eau dans le sol)

θ = angle de raccordement du ménisque (nul pour l'interface eau/verre et eau/sol)

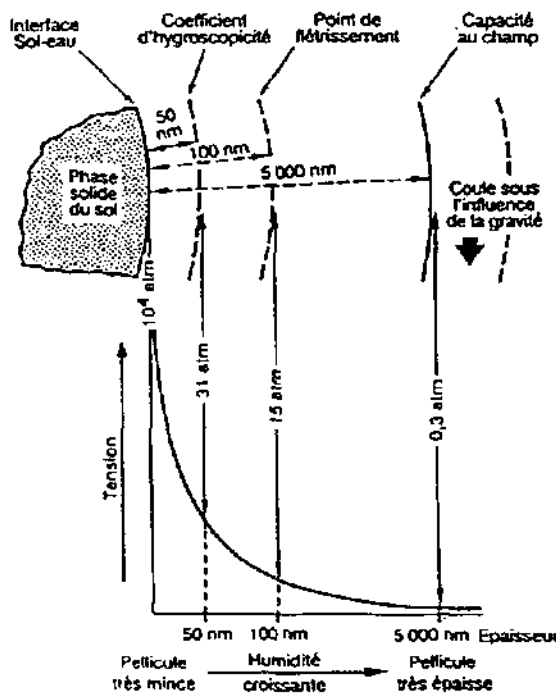
ρ = masse volumique de l'eau (g/cm^3)

γ = tension superficielle sur l'interface eau/sol
($72,7 \text{ dyn/sec}$ ou $\text{g}\cdot\text{cm/sec}^2$)

g = accélération de la pesanteur ($982,18 \text{ cm/sec}^2$)

r = rayon du pore en cm (capillaire)

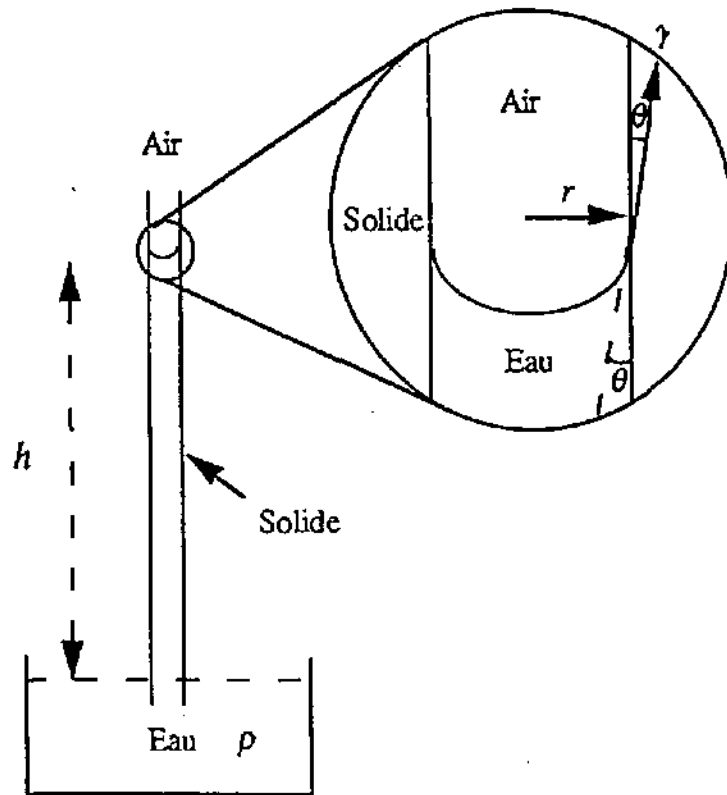
Les épaisseurs théoriques des films d'eau sur les particules de sol (CHAMAYOU et LEGROS 1989):



2. Matériel

- Table à tension avec burette (cf. croquis) et remplissage d'une matrice de billes de verre réf. Potters 2000 (diam. médian 27-36 microns)
(Commande: POTTERS-BALLOTINI SA. Boîte postale 67, St. Pourcain-sur-Sioule (France 03500), Tél.: 33 70 45 94 99, FAX: 33 70 45 57 80)
- Cylindre de Burger en métal (éventuellement en matière plastique) d'un volume de 98,17 cc (h = 50 mm et r = 25 mm) avec manchon en gaze à bluter diam. 53 microns et élastique de fixation
- Petites boîtes de Pétri (couvercle pour protéger de l'évaporation)
- Dessicateur en verre pour dégazer l'eau et les échantillons (vacuum)
- Tensiomètre de contrôle
- Eau déminéralisée et cuite (refroidie)
- Balance
- Etuve

La remontée capillaire:

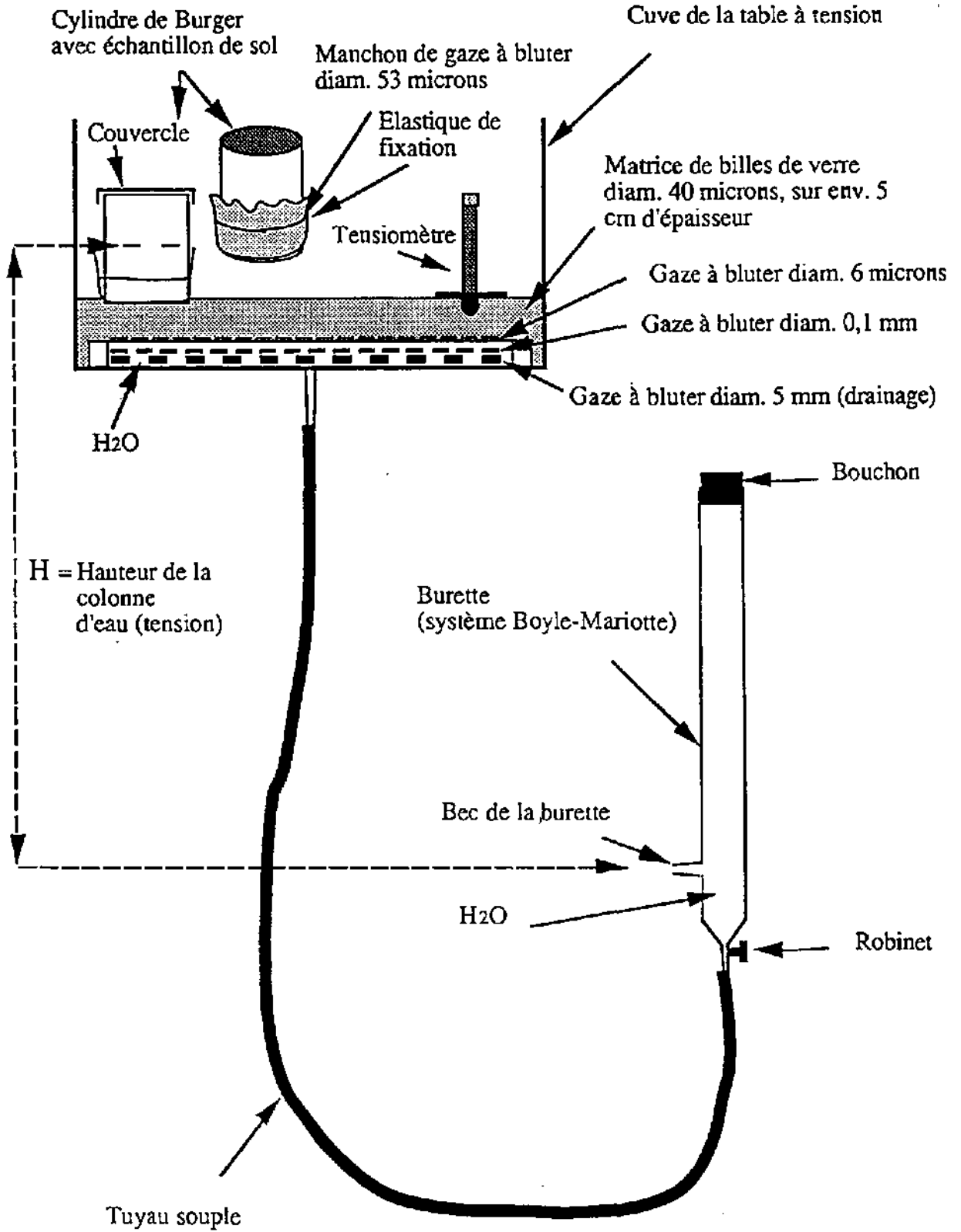


On montre ainsi que pour chaque tension exercée sur le sol, on extrait l'eau d'une certaine catégorie de pores.

En théorie on calcule les grandeurs suivantes:

Taille des pores dont on extrait l'eau	Hauteur équivalente d'une colonne d'eau (tension) et succion correspondante	Temps de stabilisation pour la mesure (méthode de la table à tension)
> 200 microns (macropores)	15 cm (pF 1,18)	1 jour
> 60 microns (mésopores grossiers)	49 cm (pF 1,69)	3 jours
> 20 microns (mésopores moyens)	145 cm (pF 2,16)	8 jours
> 6 microns (mésopores fins)	489 cm (pF 2,69)	14 jours

Croquis de la table à tension:



3. Méthode

1) Prélever soigneusement les échantillons de terre avec le cylindre de Burger. Veiller à ne pas détruire la structure du sol et respecter si possible la position naturelle de l'échantillon en enfouissant le cylindre de haut en bas, par un mouvement rotatoire. Pour le transport ou la conservation au réfrigérateur, fermer hermétiquement les deux extrémités du cylindre.

2) Couper l'échantillon de sol à ras du cylindre et poser, du côté tranchant, le manchon de gaze à bluter, en le faisant tenir avec une élastique.

3) Saturer les échantillons avec de l'eau déminéralisée dans le dessiccateur pendant au moins une nuit sous vacuum. Faire le vide d'air avec la trompe à eau. Veiller à ce que le niveau d'eau monte jusqu'au bord supérieur des cylindres. Stopper le vide avant que les échantillons commencent à barboter dans l'eau.

Le cas échéant, lorsque l'échantillon a gonflé en prenant de l'eau (tourbes, argiles!) il faut ajuster après quelque temps la coupe à ras du cylindre pour maintenir le bon volume de l'échantillon. Attention! il peut arriver que, sous l'effet du vacuum, l'échantillon glisse vers le haut et dépasse le bord supérieur du cylindre sans que son volume n'ait changé. On peut vérifier ceci en contrôlant si l'échantillon touche encore le manchon, du côté inférieur.

4) Enlever le manchon de gaze, égoutter l'échantillon quelques secondes, puis le peser au dixième de gramme près (= poids de l'échantillon saturé + cylindre). Avant de passer à l'échantillon suivant, remettre le manchon en prenant garde de ne pas perdre de terre et immerger à nouveau le cylindre dans l'eau.

5) Préparer la table à tension en faisant monter lentement (une nuit) l'eau déminéralisée cuite à travers la matrice en levant la burette, celle-ci étant remplie (il est important de compléter le niveau à temps!) et amenée progressivement à environ 5 cm au-dessus du niveau supérieur de la matrice (la monter plus haut pour accélérer le remplissage aurait pour conséquence que la matrice se fende, voire se soulève sous l'effet de la pression, devenant ainsi perméable à l'air. Il faudrait alors vider la cuve et recommencer toute l'opération délicate de remplissage).

Il faut obtenir environ 1 cm d'eau surnageant dans la cuve. A ce stade, on pourrait se permettre de rajouter de l'eau (déminéralisée et cuite) par le haut.

6) Au besoin, aspirer l'eau sortant de la matrice si elle est colorée par des acides humiques. Recommencer le lavage par dessous et l'aspiration jusqu'à ce que l'eau soit plus ou moins limpide.

7) Préparer la surface de la matrice en la ramollissant sur environ 1 cm et en mettant cette fraction en suspension dans l'eau surnageante, puis aplanir la surface avec un racloir. Il est très important de bien ramollir les bords et les coins de la cuve pour permettre à la sédimentation subséquente d'étancher la matrice.

C'est aussi la raison pour laquelle il faut éviter de bouger ou de déformer la cuve une fois que la matrice a sédimenté, car on crée ainsi des fentes provoquant la pénétration de l'air. Si l'appareil est sous tension, ceci se traduirait immédiatement par l'arrivée d'air dans le tube sous la cuve (observer!). Il faudrait alors recommencer le remplissage de la matrice ou faire preuve de beaucoup d'habileté pour éliminer l'air du circuit.

8) Dès que la matrice a sédimenté, on peut poser délicatement les cylindres en les tournant légèrement pour remettre la matrice en suspension sur les bords du cylindre et enfoncer celui-ci de 2-3 mm (il faut obtenir un bon contact entre l'échantillon et la matrice!).

Placer le tensiomètre pour contrôler ultérieurement les tensions. Couvrir les cylindres avec des boîtes de Pétri et fermer la cuve pour empêcher toute évaporation.

9) Baisser lentement la burette jusqu'à la succion désirée. La hauteur se mesure entre le bec latéral de la burette et le milieu du cylindre de Burger (voir inscription à l'extérieur de la cuve). En aucun cas de l'air ne doit apparaître dans le tube sortant sous la cuve (voir remarque au point 7). On peut contrôler l'importance de la succion à l'aide du tensiomètre et du manomètre (veiller à ne pas déchausser le tensiomètre en faisant la mesure).

Il faut toujours maintenir de l'eau dans la burette. Pour compléter, fermer le robinet, lever la burette au niveau approximatif de la matrice, et enlever le bouchon. Rouvrir le robinet une fois que la burette remplie et bouchonnée est de nouveau en position de tension.

10) Une fois atteint le temps de stabilisation pour la mesure (voir tableau), prendre les échantillons un à un, enlever délicatement le manchon en gaze pour ne pas perdre de terre et peser immédiatement (= poids de l'échantillon sous tension + cylindre). Remettre le manchon, immerger à nouveau les échantillons.

11) Pour faire la mesure à une tension supérieure, reprendre les opérations des points 3 à 10.

12) A la fin, déposer les échantillons avec le cylindre dans l'étuve à 105 degrés (éventuellement dans une cuvette pour éviter de perdre du matériel). Peser dès que le poids constant est atteint (= poids échantillon à 105 degrés + cylindre).

13) Peser également le cylindre vide (lavé et séché!).

Remarque: Lors de l'entreposage de la table à tension il faut toujours maintenir de l'eau dans la burette, dans le tuyau souple ainsi que sur la matrice. Un dessèchement de la matrice la rendrait dure et inutilisable.

4. Calculs

La procédure permet de calculer, à l'aide des différentes humidités pondérales (et grâce à la densité d'approximativement 1 de l'eau), la porosité totale (en % du volume de sol), les porosités partielles aux tensions choisies (en % du volume de sol), la capacité de rétention maximale en eau (=humidité à saturation, exprimée en % du poids sec) et la densité apparente à saturation (\neq densité apparente à humidité au champ). Le formulaire ad hoc se présente comme suit:

Données de base:

		C	D	E	F
Cylindre	Echant	Poids	Poids	Poids	Poids
No.	No.	cylindre	échant.	échant.	échant.
(Vol.=			+cylindre	+ cylindre	+ cylindre
98.17			saturé	à tension	à 105 °C
cm ³)				=.....cm	
		(g)	(g)	(g)	(g)

Calculs:

Porosité totale (%) $100(D-F)/98.17$	Porosité > microns (%) $100(D-E)/98.17$	Capacité rétention en eau (%) $100(D-F)/F-C$	Densité apparente à saturation (g/cm ³) $(F-C)/98.17$
--	---	--	---

Bibliographie:

CHAMAYOU, H. et LEGROS, J.-L. (1989): Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Presses universitaires de France, coll. Techniques vivantes, 593 pp.

MUSY, A. et SOUTTER, M. (1991): Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes. Coll. Gérer l'environnement 6, 335 pp.

HENIN, S. (1976/77): Cours de physique du sol, tome I et II. EDITEST/ORSTOM, Bruxelles et Paris. 159 et 222 pp.

TOPP, G. C. and ZEBCHUK, W. (1979): The determination of soil-water desorption curves for soil cores. Can. J. Soil Sci. 59: 19-26.

HILLEL, D. (1980): Fundamentals of soil physics. Academic Press, Inc. 413 pp.

A. Butler, décembre 1992

Annexe 6: Transects des marais tremblants de Bellelay
 Résultats des analyses des macrofossiles

transect	profil stade	profondeur (en cm)	%_sphaignes		%_herbacées		%_bois	%_agrégats
				%_mousses	%_ligneux			
1-2	A	0-17	1,9	2,9	13,8	45,5	23,2	12,6
1-2	A	17-28	2,0	2,4	82,0	5,3	6,1	2,2
1-2	A	28-35	0,7	1,9	53,1	18,7	11,1	14,5
1-2	A	35-57	0,6	1,3	85,7	5,7	5,3	1,5
1-2	A	57-102	0,0	0,7	78,6	3,9	13,2	3,6
1-2	A	102-105	0,0	1,3	14,8	28,6	46,5	8,8
1-2	A	105-119	0,0	0,8	33,6	25,7	37,8	2,1
1-2	A	119-135	0,0	0,3	52,9	18,5	26,7	1,6
1-2	A	135-188	0,0	0,0	25,4	15,6	53,2	5,8
1-2	B	0-23	1,9	9,8	2,7	47,7	29,5	8,3
1-2	B	23-77	7,4	19,5	53,9	6,4	8,3	4,6
1-2	B	77-125	1,5	4,0	82,2	4,0	3,6	4,7
1-2	B	125-135	3,1	2,7	77,1	4,9	6,8	5,3
1-2	B	135-180	1,2	1,9	75,8	2,1	5,0	14,0
1-2	B	180-200	0,3	2,2	47,8	10,9	15,5	23,3
1-2	C	0-17	46,1	23,4	17,1	8,2	3,8	1,5
1-2	C	17-21	38,6	16,1	11,6	19,8	7,1	6,8
1-2	C	21-58	15,5	10,8	47,1	5,8	12,5	8,3
1-2	C	58-72	15,5	10,7	48,7	5,5	16,7	3,0
1-2	C	72-79	14,6	10,8	46,1	7,1	18,1	3,3
1-2	C	79-143	8,8	7,3	51,1	6,3	15,1	11,5
1-2	C	143-174	7,0	6,6	23,4	14,5	34,7	13,9
1-2	C	174-197	4,5	7,7	20,4	15,5	38,6	13,3
1-2	D	0-15	40,3	10,0	20,9	20,6	6,9	1,4
1-2	D	15-22	25,8	8,6	20,3	34,1	8,6	2,5
1-2	D	22-50	6,4	8,6	52,7	7,8	15,5	8,9
1-2	D	50-120	7,3	8,0	50,4	5,5	12,6	16,2
1-2	D	120-130	13,8	6,5	41,6	5,8	9,5	22,9
1-2	D	130-190	16,9	7,3	28,6	3,7	23,0	20,5
1-2	E	0-9	24,7	21,9	35,2	16,0	1,3	0,9
1-2	E	9-17	55,7	31,7	10,6	0,7	0,4	0,9
1-2	E	17-30	15,0	18,9	25,3	31,3	8,4	1,0
1-2	E	30-80	7,3	11,6	42,4	3,0	17,4	18,2
1-2	E	80-170	9,8	12,2	40,9	3,3	7,9	25,9
1-2	E	170-185	8,6	12,4	33,8	7,5	15,5	22,1
1-2	F	0-2	19,4	64,5	3,6	12,5	0,0	0,0
1-2	F	2-7	26,5	23,2	36,3	1,9	1,6	10,5
1-2	F	7-20	52,9	27,7	9,0	4,0	2,5	4,0
1-2	F	20-30	77,0	7,1	9,9	4,2	0,0	1,8
1-2	F	30-40	71,7	3,0	21,6	2,6	0,3	0,7
1-2	F	40-68	48,0	3,0	45,7	3,3	0,0	0,0
1-2	F	68-110	9,6	29,4	48,3	1,9	10,8	0,0
1-2	F	110-125	18,9	22,0	32,9	3,3	20,7	2,2
1-2	F	125-170	9,4	16,2	31,9	5,6	17,5	19,5
3	A	0-3	0,5	31,3	1,9	27,8	29,9	8,4
3	A	3-21	0,0	1,8	33,2	15,7	11,3	38,0
3	A	21-130	0,0	2,5	83,8	2,3	6,1	5,3
3	A	130-145	0,0	2,8	70,6	2,6	11,8	12,3
3	A	145-167	0,0	0,4	90,8	1,5	4,6	2,7

Annexe 6: Suite

transect	profil stade	profondeur (en cm)	%_sphaignes	%_mousses	%_herbacées	%_ligneux	%_bois	%_agrégats
3	B	0-6	29,1	3,6	2,9	29,3	28,4	6,6
3	B	6-15	35,7	23,3	4,2	17,3	14,5	5,0
3	B	15-31	0,9	2,0	36,2	15,1	14,0	31,8
3	B	31-134	1,5	4,0	82,2	3,6	4,7	4,0
3	B	134-164	0,4	2,0	44,9	1,5	36,5	14,7
3	C	0-22	18,5	20,5	35,6	15,8	4,5	5,2
3	C	22-90	14,9	3,3	66,8	4,2	5,5	5,3
3	C	90-102	24,3	6,3	57,8	3,2	3,6	4,8
3	C	102-139	7,0	2,3	71,1	1,5	5,1	12,9
3	D	0-10	52,6	11,1	36,3	0,0	0,0	0,0
3	D	10-30	41,7	8,3	49,0	0,0	0,4	0,6
3	D	30-35	37,4	17,8	44,2	0,0	0,7	0,0
3	D	35-50	17,2	6,4	74,3	0,4	0,0	1,7
3	D	50-90	4,6	3,0	77,0	2,8	6,1	6,5
3	D	90-119	5,5	2,9	80,9	2,1	3,7	4,8
3	D	119-128	1,0	3,2	78,7	1,5	3,8	11,8
3	E	0-4	52,9	11,8	35,4	0,0	0,0	0,0
3	E	4-10	50,9	16,3	30,7	1,5	0,6	0,0
3	E	10-20	41,0	8,7	49,4	0,0	0,9	0,0
3	E	20-30	47,4	48,7	3,8	0,0	0,0	0,0
3	E	30-35	38,4	17,2	42,8	0,0	1,7	0,0
3	E	35-43	18,4	6,8	73,9	0,0	0,0	0,9
3	E	43-138	3,1	5,2	80,1	1,1	6,3	4,2
3	E	138-152	3,5	3,9	40,2	2,2	38,3	11,9
4	A	0-3	91,1	1,7	0,4	6,6	0,2	0,0
4	A	3-7	82,8	3,4	4,5	5,8	0,8	2,6
4	A	7-12	24,7	17,4	33,0	16,5	3,2	5,2
4	A	12-19	2,2	8,1	67,6	6,4	5,0	10,7
4	A	19-168	2,2	3,1	80,6	3,5	2,8	7,8
4	B	0-2	82,6	3,2	0,7	5,4	8,1	0,0
4	B	2-15	23,4	17,4	30,3	17,8	7,8	3,4
4	B	15-19	14,3	5,7	55,9	7,5	6,3	10,3
4	B	19-191	21,1	3,1	57,7	7,1	3,3	7,7
4	C	0-7	59,2	2,5	1,3	34,9	2,1	0,0
4	C	7-20	9,9	20,1	2,9	44,9	7,4	14,7
4	C	20-35	74,0	14,4	0,4	9,9	0,7	0,6
4	C	35-75	5,0	9,9	70,0	4,8	1,1	9,2
4	C	75-170	2,1	2,3	86,7	2,1	1,5	5,2
4	D	0-10	2,0	88,5	0,8	5,1	2,8	0,8
4	D	10-28	6,1	84,1	0,6	3,3	3,7	2,2
4	D	28-38	39,8	38,6	8,1	7,0	2,3	4,2
4	D	38-182	0,6	1,5	83,2	2,0	6,9	5,8
4	E	0-10	67,5	13,7	2,1	16,2	0,4	0,0
4	E	10-14	63,9	6,5	20,5	7,8	0,0	1,3
4	E	14-18	66,9	3,3	22,2	7,6	0,0	0,0
4	E	18-25	50,0	5,0	23,4	13,2	2,1	6,2
4	E	25-35	52,4	14,3	22,9	2,9	2,1	5,4
4	E	35-40	14,6	6,3	22,7	27,9	7,1	21,3
4	E	40-196	0,4	0,6	87,1	1,3	1,7	8,9
4	F	0-10	39,6	29,8	10,0	11,6	4,5	4,4
4	F	10-25	49,9	23,2	4,6	12,2	1,9	8,2
4	F	25-35	53,1	32,8	3,6	3,3	1,3	5,9
4	F	35-40	15,5	9,7	20,0	28,5	6,6	19,8
4	F	40-191	1,0	0,6	87,2	1,4	1,7	8,1

Annexe 7: **Organisation spatiale des sites de recherches des trois séries évolutives**
 Ce tableau synoptique est en relation directe avec les planches photographiques 1, 2 et 3

	Site de recherches	Physionomie
Série des touradons		
Système fonctionnel terrestre (planche 1)		
Stade 1	Les Pontins	Touradons d' <i>Eriophorum vaginatum</i> épars sur une surface de tourbe dénudée, légèrement érodée à cause d'une petite pente. Le site est actuellement en cours de boisement par le
Stade 2	La Chaux-d'Abel	Surface densément couverte de touradons d' <i>Eriophorum vaginatum</i> serrés, avec de petites
Stade 3	La Chaux-d'Abel	plages de sphaignes sous les feuilles et tiges couchées sur le sol.
Stade 4	La Chaux-d'Abel	Surface densément couverte de touradons d' <i>Eriophorum vaginatum</i> , avec une forte couverture de sphaignes au sol, entre les touradons. Surface couverte de sphaignes, celles-ci couvrant les touradons d' <i>Eriophorum vaginatum</i> dont seules les tiges et feuilles sortent du tapis sphagnal continu.
Série des gazons muscinaux		
Système fonctionnel terrestre (planche 2)		
Stade 1	Martel-Dernier	Surface de tourbe nue avec quelques coussinets épars de <i>Polytrichum alpestre</i> . Le terrain est en légère pente et subit une érosion assez forte.
Stade 2	Le Cachot	Surface couverte d'un gazon de <i>Polytrichum alpestre</i> continu avec quelques pieds isolés de sphaignes dans le tapis muscinal.
Stade 3	Le Cachot	Surface couverte d'un gazon de <i>Polytrichum alpestre</i> continu avec des plages de sphaignes compactes dans les tapis muscinal.
Stade 4	Le Cachot	Tapis de sphaignes continus avec quelques présences éparées de <i>Polytrichum alpestre</i> . Les sphaignes différencient de jeunes buttes couvertes de chaméphytes.
Série des marais tremblants		
Système fonctionnel aquatique (planche 3)		
Stade 1	Bellelay	Eau libre avec radeau flottant de <i>Potentilla palustris</i> et quelques sphaignes.
Stade 2	Bellelay	Radeau végétal flottant (<i>Potentilla palustris</i> et <i>Carex lasiocarpa</i>) avec tapis continu lâche de sphaignes
Stade 3	Bellelay	Radeau végétal flottant à dominance de <i>Carex lasiocarpa</i> et épais tapis de sphaignes
Stade 4	Bellelay	Tapis de sphaignes totalement gorgé d'eau avec alternance de buttes et de replats. Présence de chaméphytes