



Contribution à l'étude de la répartition et du fonctionnement des sols de haute montagne. Massifs des Aiguilles Rouges et du Mont Blanc

Etienne Dambrine

► To cite this version:

Etienne Dambrine. Contribution à l'étude de la répartition et du fonctionnement des sols de haute montagne. Massifs des Aiguilles Rouges et du Mont Blanc. Milieux et Changements globaux. Université Paris VII, 1985. Français. <NNT : >. <tel-02520860>

HAL Id: tel-02520860

<https://theses.hal.science/tel-02520860v1>

Submitted on 27 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

UNIVERSITE DE PARIS VII

C.N.R.A. - VERSAILLES

THÈSE

présentée à
l'Université de PARIS VII

pour l'obtention du
Doctorat de Spécialité en Géologie Appliquée

par

Etienne DAMBRINE

Contribution à l'étude de la repartition et du fonctionnement des sols de haute montagne

massifs des aiguilles rouges
et du mont blanc

soutenue le 9 Octobre 1985 devant la Commission d'examen

MM. G. CALAS
M. ROBERT
M. BONNEAU
D. RIGHI
G. SARAZIN

Mme Y. GUBLER

Président
Rapporteur

Membre invité

REMERCIEMENTS

Ce travail a été entrepris à l'initiative du comité scientifique des Réserves Naturelles de Haute Savoie et soutenu financièrement par le Service Environnement de la Direction Départementale de l'Agriculture de Haute Savoie. Il a été poursuivi grâce à une aide de la D.G.R.S.T.

Avant d'en exposer les résultats, je voudrai exprimer ici tous mes remerciements et ma gratitude aux nombreuses personnes qui m'ont permis de mener ce travail à bien, et plus particulièrement :

- A Madame Yvonne GUBLER et Monsieur Jean EYHERALDE, qui, entre autres tâches, président aux destinées de la Réserve des Aiguilles Rouges, pour leur soutien intellectuel, l'amitié et la générosité qu'ils ont constamment témoignées à notre égard.

- A Messieurs Jean-Pierre COURTIN et Roger ESTEVE du Service Environnement de la D.D.A de Haute Savoie, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me laissant libre de mener un travail dont les applications ne sont pas immédiates.

- A Béatrice ANDRE qui a rendu possible ce long séjour à Chamonix, en nous accueillant dans son chalet.

- A Michel ROBERT, Jean Marcel DORIOZ et Jean Paul LEGROS qui à travers leur soutien intellectuel, leur enthousiasme de chercheur, et leur amitié m'ont donné la "foi" nécessaire à l'achèvement de ce travail.

- A Monsieur Gérard BOCQUIER, dont l'expérience et l'esprit de synthèse ont été importants pour l'orientation de cette étude. Sa disparition brutale dans des circonstances mal élucidées m'aura beaucoup attristé.

- A Monsieur Maurice BONNEAU qui me fait l'honneur de venir juger ce travail avec toute son expérience de la complexité des sols forestiers.

- A Monsieur Dominique RIGHI qui m'a fait bénéficier de sa compétence et de son expérience sur les problèmes touchant à la podzolisation.

- A Gérard SARAZIN qui par sa disponibilité, sa rigueur scientifique et son amitié m'a permis et donné les moyens d'envisager l'aspect géochimique de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes de différents organismes, qui m'ont fait bénéficier de leur aide scientifique ou matérielle tant sur le terrain qu'au laboratoire et en particulier :

- Monsieur Jacques BERTHELIN du C.P.B de Nancy
- Messieurs Philippe ILDEFONSE et Philippe BROMBLET du laboratoire de pédologie de l'Université Paris VII
- Monsieur Louis TROSSET de l'Université de Chambéry
- Messieurs J.F. PONGE et G. VANNIER du Museum d'Histoire Naturelle de Brunoy
- Messieurs Jacques RANGER et Pascal BONNAUD du C.R.F. Nancy
- Monsieur LAFEUILLE et toute l'équipe du Centre d'Etude de la Neige de Grenoble
- Monsieur BRAVARD et ses sympathiques collègues de la Station Météorologique de Chamonix
- Monsieur CHARLET ainsi que tout le personnel du télécabine des Grands Montets

Enfin, je remercie très vivement toute l'équipe du département de Science du Sol de l'INRA de Versailles, qui a subi avec gentillesse ma présence tapageuse, (mais heureusement saisonnière) et l'envahissement périodique de leurs paillasses par mon camion d'échantillons. Pour ne pas tous les citer, je ne nommerai personne, à l'exception de Madame Thérèse DIMEY qui a parcouru à toute allure, sur sa machine magique, autant de chemin que j'en ai fait en montagne en trois ans.

Si je signe seul ce travail, c'est une bien drôle d'idée : de la béarnaise aux collemboles en passant par les effeuillages de rhododendron, des bises de l'aube ensoleillée jusqu'aux nuits blanches de la rédaction finale, Toun et Leo l'auront très intensément partagé. Ce mémoire est le notre.

P L A N

	Pages
CHAPITRE I - CADRE GENERAL DE L'ETUDE	
1. Cadre géologique et morphologique de l'étude	5
1.1 - Présentation	5
1.2 - Historique - formation du bâti	6
1.3 - Formation du modelé actuel	10
1.4 - Lithologie	12
1.5 - Nature et répartition des formations superficielles	16
1.6 - Hydrologie	20
1.7 - Conclusion	21
2. Cadre climatique	22
2.1 - Précipitations	22
2.2 - Températures	24
2.3. - Conclusion	25
3. Végétation	25
4. Conclusion	27
CHAPITRE II - LES SOLS DE LA VALLEE DE CHAMONIX RECHERCHE DES RELATIONS GENERALES SOLS-MILIEUX	
Introduction	29
1. Sols de l'étage alpin	31
1.1 - Répartition des sols dans le paysage	31
1.2 - Les sols différenciés sur des substrats fragmentés	34
1.3 - Les sols développés sur des substrats compacts	40
1.4 - Présentation des relations générales sols-milieus à l'étage alpin	45
1.5 - Conclusion à l'étude des sols de l'étage alpin	48
2. Les sols de l'étage subalpin	51
2.1 - Répartition des sols dans le paysage	51
2.2 - Les sols développés sur des substrats non fragmentés	54
2.3 - Les sols développés sur des substrats profondément fragmentés	55

	Pages
2.4 - Présentation des relations générales sols-milieus à l'étage subalpin	64
2.5 - Conclusion à l'étude des sols de l'étage subalpin	66
3. Les sols de l'étage montagnard	69
3.1 - Présentation	69
3.2 - Conclusion	71
4. Conclusion à l'étude des relations générales sols- milieus	71
 CHAPITRE III - FONCTIONNEMENT ACTUEL D'UNE SEQUENCE DE SOLS	
1. Présentation	77
1.1 - Introduction	77
1.2 - Représentativité climatique de l'année étudiée	79
2. Matériel et méthodes	83
2.1 - Matériel et méthodes de mesure de la température	80
2.2 - Matériel et méthodes utilisés pour l'étude des teneurs en eau	80
2.3 - Matériel et méthodes utilisés en lysimétrie	80
2.4 - Matériel et méthodes d'utilisation des minéraux test	83
2.5 - Matériel et méthodes pour l'étude de la minéralisation de l'azote organique du sol et de la nitrification d'une solution d'ammonium ajouté	84
2.6 - Matériel et méthodes utilisés en respirométrie	85
2.7 - Matériel et méthodes utilisés pour l'étude des premiers stades de la biodégradation	85
2.8 - Matériel et méthodes d'extraction de la faune	86
3. NIVOSE - Ranker cryptopodzolique humifère sous pelouse alpine	87
3.1 - Présentation de la station	87
3.2 - Description morphologique et analytique du sol de référence	88
3.2.1 - Description du sol	88
3.2.2 - Organisation et micro-analyse de quelques constituants	88
3.2.3 - Données analytiques	91
3.3 - Pédoclimat	94
3.3.1 - Régime thermique	94
3.3.2 - Régime hydrique	96
3.3.3 - Conclusion	97
3.4 - Fonctionnement biogéochimique actuel	97

	Pages
3.4.1 - Etude lysimétrique	97
3.4.2 - Evolution chimique et minéralogique de vermiculites test	100
3.4.3 - Synthèse : fonctionnement géochimique actuel et morphologie du profil	103
3.4.4 - Cycle biologique	105
3.5 - Etude de la biodégradation	106
3.5.1 - Respiration du sol	106
3.5.2 - Evolution comparée de substrats test lors de la biodégradation	107
3.5.3 - Mise en évidence de la faune du sol	111
3.5.4 - Conclusion à l'étude de la biodégradation	113
3.6 - Conclusion à l'étude de la station de Nivose	113
4. BALME - Sol podzolique sur calcschiste sous pelouse alpine	117
4.1 - Présentation de la station	117
4.2 - Description morphologique et analytique du sol de référence	119
4.2.1 - Description du sol	119
4.2.2 - Organisation et micro-analyse en place de quelques constituants	120
4.2.3 - Données analytiques	123
4.2.4 - Interprétation	126
4.3 - Pédoclimat	127
4.3.1 - Régime thermique	127
4.3.2 - Régime hydrique	128
4.3.3 - Interprétation	130
4.4 - Etude du fonctionnement biogéochimique	130
4.4.1 - Etude lysimétrique	130
4.4.2 - Evolution chimique et minéralogique de vermiculites test	141
4.4.3 - Fonctionnement géochimique actuel et morphologie du profil	144
4.4.4 - Cycle biologique	146
4.5 - Conclusion à l'étude de la station de Balme	149
5. LOGNAN - Prodzol humoferrugineux sur moraine sous une lande à rhododendron	151
5.1 - Présentation de la station	151
5.1.1 - Présentation générale	151
5.1.2 - Morphologie et répartition des sols	152

	Pages
5.2 - Description morphologique et analytique des sols de référence	156
5.2.1 - Description morphologique	156
5.2.2 - Organisation et micro-analyse de quelques constituants	158
5.2.3 - Données analytiques	164
5.3 - Pédoclimat	167
5.3.1 - Régime thermique	167
5.3.2 - Régime hydrique	168
5.4 - Etude du fonctionnement biogéochimique actuel des sols	174
5.4.1 - Etude lysimétrique	174
5.4.2 - Evolution chimique et minéralogique de vermiculites test	182
5.4.3 - Synthèse : fonctionnement géochimique actuel et morphologie du profil	186
5.4.4 - Relation entre le cycle biologique et le fonctionnement géochimique actuel du sol	187
5.5 - Etude de la biodégradation de la matière organique	189
5.5.1 - Mesure du dégagement de gaz carbonique à la surface du sol	189
5.5.2 - Evolution morphologique et pondérale des litières test	191
5.5.3 - Inventaire succinct de la faune du sol	196
5.5.4 - Conclusion à l'étude de la biodégradation	197
5.6 - Conclusion à l'étude des sols de Lognan	198
6. LAVANCHER - Sol brun faiblement ocreux sur colluvions de pente, sous pessière montagnarde	201
6.1 - Présentation de la station	201
6.2 - Description morphologique et analytique du sol de référence	202
6.2.1 - Description du sol	202
6.2.2 - Organisation de quelques constituants à l'échelle microscopique	202
6.2.3 - Données analytiques	203
6.3 - Pédoclimat	205
6.3.1 - Introduction	205
6.3.2 - Régime thermique	206
6.3.3 - Régime hydrique	209
6.3.4 - Conclusion	211

	Pages
6.4 - Etude du fonctionnement biogéochimique	211
6.4.1 - Etude lysimétrique	211
6.4.2 - Etude expérimentale de l'évolution in situ de minéraux test	221
6.4.3 - Fonctionnement géochimique actuel du sol et morphologie du profil	224
6.4.4 - Relation entre le cycle biologique et le fonctionnement géochimique du sol	225
6.5 - Etude de la biodégradation de la matière organique	227
6.5.1 - Mesure du dégagement de gaz carbonique à la surface du sol	229
6.5.2 - Evolution morphologique et pondérale des litières test	229
6.5.3 - Inventaire succinct de la faune du sol	232
6.5.4 - Interprétation	233
6.6 - Conclusion à l'étude de la station du Lavancher	234
CHAPITRE IV - DISCUSSION	237
Introduction	237
1. Comparaison entre les fonctionnements biogéochimiques actuels des quatre stations étudiées	237
1.1 - Influence du facteur bioclimatique sur le pédoclimat	239
1.2 - Influence du facteur bioclimatique sur le fonctionnement biologique des sols	244
1.2.1 - Biodégradation de la matière organique	244
1.2.2 - Cycle biologique	250
1.3 - Fonctionnements biogéochimiques	254
1.3.1 - Evolution des minéraux test	254
1.3.2 - Lysimétrie	256
2. Relation entre les grands processus de Pédogenèse et l'étagement bioclimatique altitudinal	262
3. Relation entre les fonctionnements biogéochimiques étudiés et certains des grands facteurs du milieu	266
Conclusion générale	269

INTRODUCTION GENERALE

Les sols de haute montagne ont en France longtemps été méconnus, sans doute en raison du faible intérêt économique attribué à ces régions. Cette carence s'est comblée à partir des années cinquante sous l'influence de divers travaux européens montrant que ces sols présentaient des évolutions pédologiques fortes et originales (PALLMAN, 1947 ; DUCHAUFOR, 1952 ; KUBIENA, 1953 ; TRICARD et CAILLEUX, 1967).

A la suite de ces travaux, il est apparu que la haute montagne, en raison de la variété des conditions bioclimatiques qui s'y rencontrent sur une superficie restreinte, pourrait représenter un milieu modèle pour étudier l'influence spécifique de ces facteurs sur l'évolution des sols. Par ailleurs, la transformation des pratiques agricoles ainsi que l'implantation d'équipements touristiques "lourds" ont suscité de nombreuses questions sur l'évolution de ce milieu sous l'influence de ces nouvelles contraintes.

Cet intérêt renouvelé pour la haute montagne s'est traduit par de nombreux travaux de pédologie récents orientés suivant divers axes :

- La caractérisation physico-chimique des sols et les relations statiques sol-climat-végétation-roche-mère (RICHARD, 1975 ; BARTOLI, 1966 ; GENSAC, 1977 ; VERGER, 1974 ; TROSSET, 1980 ; CADEL, 1980).
- Le rôle du substrat "dynamique" et en particulier celui du degré de fragmentation du substrat (CABIDOCHÉ, 1979 ; VERGES, 1982).
- Le rôle des activités humaines sur la pédogénèse (NEUWINGER, 1967 ; BUURMAN, 1976 ; van OORT, 1984).
- L'activité biologique de ces sols (MONTCOUYOUX, 1976 ; LABROUE, 1976 ; MATHEY et al., 1981).

Structurée par deux grands massifs cristallins d'altitude élevée, la région de Chamonix, qui forme le cadre de ce travail, constitue un milieu naturel modèle pour l'étude de l'influence des grands facteurs pédogénétiques sur la différenciation des sols. En effet la puissance et la diversité des formations superficielles, dont la mise en place peut être précisée du fait de la persistance d'une géomorphogénèse glaciaire actuelle, permettent l'étude dans toute leur variété, des relations entre les formes du relief et les sols.

Par ailleurs, au-delà de l'étagement bioclimatique altitudinal, la situation climatique de cette vallée, à la charnière entre les alpes externes humides sous influence océanique et les alpes internes plus sèches à tendance continentale, favorise l'expression d'une très grande diversité de microclimats, à laquelle est associée une vaste gamme de formations végétales.

Dans cette vallée, des travaux antérieurs avaient décrit l'étagement général des sols (LEGROS et CABIDOCHÉ 1977, RICHARD 1975) et montré que la podzolisation, présente au niveau des processus à tous les étages bioclimatiques, s'exprimait le plus intensément à l'étage subalpin (ROBERT et al., 1980).

Face à cette diversité des microclimats et des formations superficielles, nous avons commencé par rechercher les relations générales entre les sols et leurs milieux suivant l'axe esquissé par LEGROS et CABIDOCHÉ (1977). Ceci nous a conduit, à travers un travail cartographique, à préciser les principaux facteurs du milieu responsables de la répartition et de la diversité des sols à chaque étage bioclimatique.

A l'issue de cette prospection, nous avons entrepris une étude approfondie du fonctionnement biogéochimique actuel des sols de quatre stations étagées, jugées particulièrement intéressantes et représentatives.

Cet axe de travail a été choisi car, il nous a semblé le plus approprié pour fournir des explications de portée générale

sur les mécanismes par lesquels l'étagement du climat et de la végétation, à travers la diversité des conditions du milieu, déterminent un étagement général des sols.

Ce choix n'était pas sans risques : en effet, les études de fonctionnement des sols sont encore très peu nombreuses et reposent sur des dispositifs expérimentaux et sur des méthodes de mesure dont les effets sur le fonctionnement du sol peuvent ne pas être négligeables (BONNE, 1982).

Pour pallier ces inconvénients, nous avons utilisé une vaste gamme de techniques complémentaires, pour lesquelles nous disposons de références : respirométrie (DOMMERGUES, 1968), litières test (MANGENOT, 1966 ; TOUTAIN, 1981) lysimétrie (VEDY, 1978 ; BONNE, 1982 ; NYS, 1979), minéraux tests (BERTHELIN, 1983 ; RANGER et ROBERT 1985). Nous avons systématiquement confronté les résultats obtenus à travers ces différentes techniques avec l'organisation des sols en place à l'échelle microscopique.

Les mécanismes révélés à la suite de cette étude nous ont alors permis de préciser le rôle de certains des grands facteurs du milieu mis en évidence lors de la prospection.

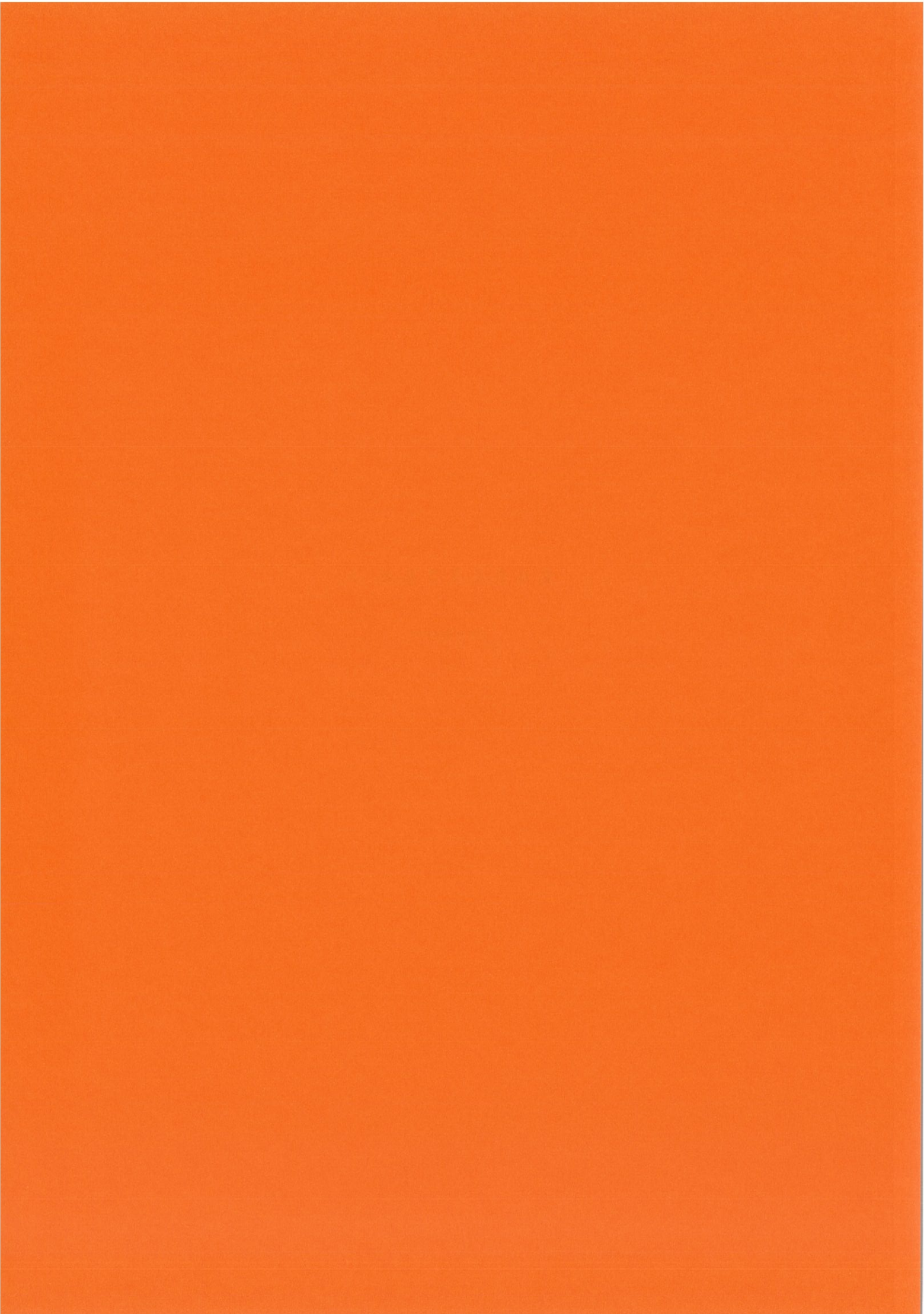
Ce travail se divise donc en trois parties d'importance inégale :

Dans les deux premiers chapitres, nous présentons le cadre de l'étude ainsi que les relations générales sols-milieux.

Dans le troisième chapitre, qui correspond au coeur du travail, sont décrits de manière approfondie les fonctionnements biogéochimiques actuels des sols de quatre stations étagées.

Enfin, le quatrième chapitre, présente une synthèse entre d'une part, les différents fonctionnements des sols étudiés, et d'autre part, la répartition générale des sols dans le paysage.

CHAPITRE I



CHAPITRE I

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Nous présenterons tout d'abord les grandes données géologiques, lithologiques et morphologiques, puis nous décrirons succinctement l'étagement du climat, de la végétation et des sols.

I. CADRE GEOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE DE L'ETUDE

1.1 - PRESENTATION

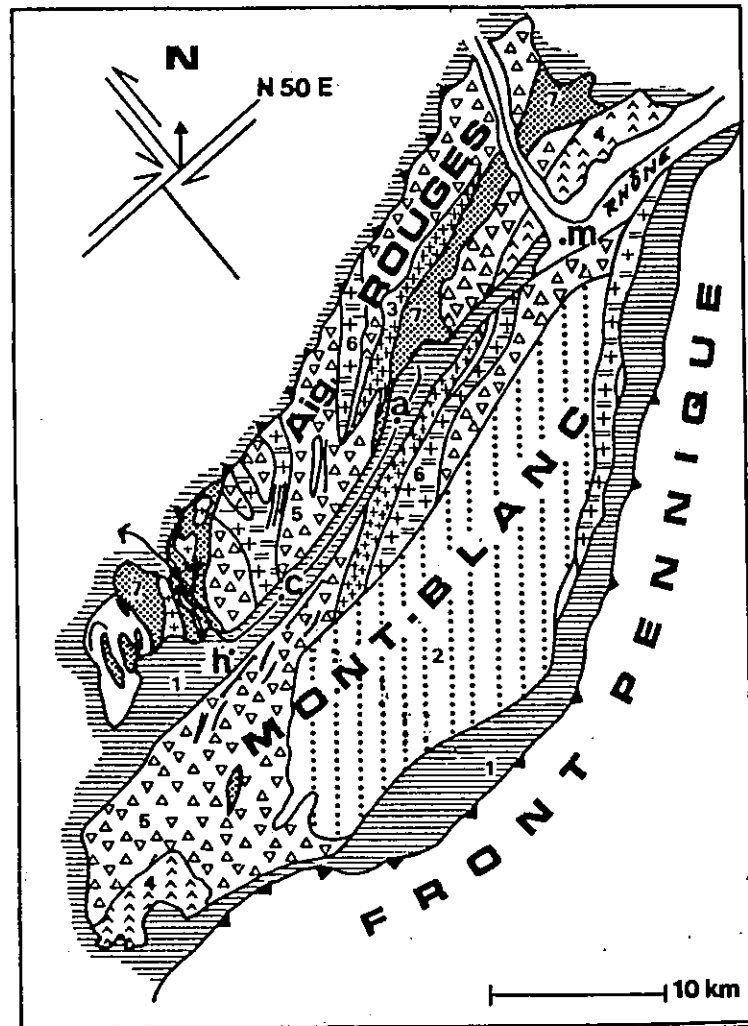
Située en Haute-Savoie dans les Alpes Françaises du Nord, la région étudiée appartient à la grande zone structurale des massifs cristallins externes, laquelle s'allonge sans interruption de la vallée de la Durance à la cluse du Rhône Valaisan.

Elle est composée de blocs, grossièrement parallèles, séparés par un étroit couloir orienté Sud-Ouest - Nord-Est qui correspond à la vallée de Chamonix proprement dite. L'ensemble est limité au Nord par le coude que dessine le Rhône à Martigny (Fig.1).

Le bloc oriental (Mont-Blanc), qui culmine à 4807 m dessine une énorme amygdale d'une cinquantaine de kilomètres sur une dizaine de large, limitée à l'Est par le Val Ferret

Fig. 1

ESQUISSE GEOLOGIQUE



1. Série sédimentaire d'âge secondaire. 2. Granite hercynien "rajeuni" à 32 Ma. 3. Granite hercynien 270 Ma. 4. Granodiorite et migmatite à 600 Ma. 5. Anateixites. 6. Gneiss ondulés. 7. Carbonifère - a Argentières c Chamonix h Les Houches m Martigny.

(d'après JF von RAUMER 1974)

(suisse et italien) et le val Veni. Il est hérissé d'arêtes découpées, groupées en lignes de crêtes, tantôt parallèles (groupes des Aiguilles de Chamonix, Jorasses, Dolent), tantôt obliques (Talèfre, Courtes, Droites, A. Verte) à la vallée principale. Ces crêtes sont séparées par de longues vallées glaciaires de même orientation (Mer de Glace, Glacier d'Argentière)...

Le bloc occidental (Aiguilles Rouges) dessine un rectangle allongé parallèlement à la vallée de Chamonix, dont la largeur est de 4 à 5 km. Il est formé par une crête continue de sommets qui ne dépassent pas 3000 m, coupée au Sud par le défilé de l'Arve entre les Houches et Servoz, suivant une direction Nord 25° Ouest. Toutes ces directions correspondent à celles de grandes cassures d'un vieux socle rigide fait de roches cristallines et de granites.

La vallée de Chamonix, occupée de terrains sédimentaires plus tendres, plus friables, s'est creusée très tardivement ; elle s'est alignée sur de profondes cassures du vieux socle, orientées Nord 50° Est.

1.2 - HISTORIQUE : FORMATION DU BÂTI (Y.GUBLER, 1976)

Période ancienne :

. **1ère étape** identifiée. Très vieux socle cristallin daté de 600 millions d'années (Fig.1).

. **2ème étape** d'une durée approximativement de 250 millions d'années qui correspond à deux périodes de construction. Pendant la plus ancienne se forment des gneiss résultant d'un métamorphisme régional et de l'orogénèse calédonienne.

La seconde y apporte des modifications importantes avec formation de granites datés de 355 millions d'années

(Aiguille du Midi), d'anatexites, d'amphibolites (Fig.1). Des plis d'orientation générale Nord-Sud, des fractures se dessinent au cours de cette orogénèse hercynienne précoce.

. **3ème étape** : longue période d'érosion de 20 millions d'années suivie d'accumulation de dépôts sédimentaires dans les reliefs en creux précédemment créés. Ces dépôts continentaux à plantes reposent en discordance sur les granites, les gneiss antérieurs. Le fait peut s'observer au lac de Pormenaz. Ces dépôts détritiques d'âge carbonifère supérieur contiennent plusieurs niveaux de galets de gneiss.

. **4ème étape** : postérieurement à ces dépôts, dont les débris végétaux attestent un âge de 280 millions d'années, de nouvelles déformations, accompagnées de manifestations volcaniques, achèvent l'édification de la partie ancienne de la construction, et de grandes lignes de fractures préfigurent le découpage ultérieur du bâti. Les dépôts du carbonifère subissent un très léger métamorphisme et sont pincés dans ces fractures.

L'histoire ancienne (calédonienne et hercynienne) de ce secteur de la chaîne alpine s'arrête ici. Jusque là, Mont-Blanc et Aiguilles Rouges formaient un seul ensemble avec le Massif-Central, les Monts du Lyonnais. A ce stade, les grands traits de la structure des Aiguilles Rouges sont définitivement acquis. Malgré de faibles retouches, rejeu de failles, léger métamorphisme qui l'affecteront à la fin du cycle alpin, elle conservera son caractère de style ancien.

Période alpine :

La deuxième grande période de construction s'élabore pendant les temps secondaire et tertiaire avec des matériaux sédimentaires (grès, calcaires, argiles), la plupart formés en milieu marin.

. **5ème étape** : après une longue période d'érosion des reliefs hercyniens, Aiguilles Rouges et Mont-Blanc sont recouverts au Trias (il y a 190 millions d'années) de grès et conglomérats.

A partir de cette période, les deux blocs évoluent séparément.

C'est au cours des temps jurassiques et du crétacé (période longue de 80 millions d'années) que la différenciation s'accuse. Le bâti des Aiguilles Rouges n'est que rarement recouvert de dépôts marins, l'épaisseur conservée de ceux-ci ne dépasse pas quelques mètres (Belvédère, Col de Salenton, Lac de Pormenaz).

Beaucoup moins précises sont nos connaissances sur les matériaux sédimentaires déposés directement sur le bâti ancien du Mont-Blanc du fait que celui-ci a été fortement affecté par les orogénèses alpines précoces et tardives.

On peut supposer que la zone du Mont-Blanc, s'écartant de celle des Aiguilles Rouges parallèlement aux grandes fractures tardihercyniennes, se recouvrait de sédiments.

On sait que dès la fin du crétacé supérieur, le bloc Mont-Blanc a été soumis à un métamorphisme léger, qu'à l'éocène, 53 millions d'années, le granite du Mont-Blanc (granite hercynien) a été soumise à des pressions si élevées qu'il ait pu s'y produire un certain nombre de paragenèses.

. **6ème étape** : les derniers mouvements datés de 15 millions d'années déterminent la surrection du bloc Mont-Blanc compensée par des effondrements du domaine méditerranéen. Les couvertures sédimentaires sous lesquelles il était enseveli s'en décollent au niveau des couches les plus plastiques et glissent vers le Nord par dessus les Aiguilles Rouges en se repliant sur elles-mêmes. C'est à elles qu'il faut rattacher les hautes parois de la chaîne des Fiz au-dessus de Servoz. Une partie des dépôts a été piégée le long d'une ancienne fracture hercynienne, cette fracture correspondant à la vallée de Chamonix. Dans cette

ultime étape le Mont-Blanc chevauche sa propre couverture sédimentaire suivant une ligne de front qui préfigure la future vallée de Chamonix.

1.3 - FORMATION DU MODELE ACTUEL

Observée en coupe à partir de l'une de ses extrémités, la vallée de Chamonix apparaît comme une vallée encaissée, dont les parois abruptes s'infléchissent aux alentours de la côte 2000 m pour s'ouvrir sur des cirques. L'ensemble est encadré par les abrupts rocheux et les glaciers des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Ces formes ont été en grande partie modelées par les glaces, lors des grandes fluctuations climatiques de notre ère.

Il y a environ 20.000 ans, lors de la dernière grande phase würmienne, les glaciers du versant méridional du Mont-Blanc débordaient dans la plaine du Pô. Au Nord par les vallées de l'Arve et du Rhône, ils envahissaient la dépression molassique de Lausanne, se divisant alors en deux branches, l'une couvrant le plateau suisse jusqu'à Soleure, l'autre parvenant à traverser le Jura et à pénétrer en Dauphiné jusqu'à 20 km de Lyon.

La glaciation würmienne prend fin il y a environ 15.000 ans et les glaciers reculent alors de façon saccadée mais rapide : c'est la période tardiglaciaire jusque vers - 7.500 avant J.C. C'est de cette époque que date une grande partie de dépôts morainiques situés aux alentours de la côte 2000 m et en fond de vallée.

Depuis -7500 (période postglaciaire), les glaciers alpins n'ont plus bougé que dans des limites assez modestes, couvrant ou découvrant, au gré de variations climatiques mineures, des espaces n'excédant pas 1 à 2 km (pour les plus puissants) en avant de leur front actuel, quelques phases de

crue (-1500 à -1100 surtout, puis 1600 à 1860) alternant avec des époques parfois même encore plus chaudes qu'aujourd'hui (LEROY LADURIE, 1983).

Actuellement, cinq grands glaciers (Tour, Argentière, Mer de Glace, Bossons, Taconnaz) descendent à proximité du fond de vallée. Les glaciers de cirque qui regardent la vallée sont, en général, suspendus au-dessus de 2400 m.

C'est donc un système d'érosion typique des pays froids qui est responsable du modelé actuel ; cependant son action a été orientée par trois types de données structurales :

- Les terrains sédimentaires, relativement meubles, qui occupent un couloir entre le Mont-Blanc et les Aiguilles Rouges ont été érodés préférentiellement par rapport aux roches cristallines dures. Le modelé "en auge" de la vallée, et le calibrage (étroit à l'amont et large à l'aval) s'expliquent en fait non par le creusement des glaces, mais par la structure géologique préexistante. Par ailleurs, un hiatus dans les polis glaciaires entre les côtes 1500 et 1800 (VEYRET, 1959) ne permet pas de trancher quant aux agents de creusement de la vallée.

- Les grandes fractures hercyniennes sont à l'origine des zones de faiblesses par lesquelles ont pu s'insinuer les glaciers (vallée de la Mer de Glace et d'Argentière).

La zone de faille du col des Montets et le profond sillon carbonifère des Montées Pelissier ont fourni aux glaciers des exutoires obliques de basse altitude, qui ont permis la conservation des deux "bouchons" sédimentaires barrant les extrémités de la vallée (Col de Balme, Col de Voz).

- La fissuration : les fissures et diaclases qui affectent la majorité des roches cristallines ont considérablement facilité l'action du gel. Elles

contribuent par ailleurs à réduire notablement l'action du ruissellement.

1.4 - LITHOLOGIE : NATURE ET COMPOSITION DES PRINCIPALES ROCHES (J. BELLIERE, 1956)

1.4.1 - Les roches cristallines

* Les gneiss type "Lac Cornu" (excepté les gneiss d'homogénéisation)

Ils affleurent sur une large surface tant dans les Aiguilles Rouges que dans le sous-bassement du Mont-Blanc (anatexites de la Fig.1).

Ils se caractérisent par :

- La disposition des roches en lits parallèles et continus d'épaisseur variée (quelques centimètres à quelques dizaines de mètres).
- La variété des roches : si les plus abondantes sont les gneiss et les micaschistes, la série comprend des gneiss de granularité plus ou moins développée, des gneiss lités, rubanés, ocellés, des leptynites, des amphibolitoschistes parfois fortement grenatifères, des cipolins, calcaires cristallins à silicates, schistes graphiteux, etc...

En conséquence leur composition chimique et minéralogique est assez variable (Tableau 1).

* Les gneiss d'homogénéisation ou gneiss ocellés

Ils forment l'armature de parois très abruptes dans les Aiguilles Rouges (Brévent, Planpraz). Ce sont des masses puissantes homogènes sans litage ni rubanement. Les roches sont toujours bien grenues et montrent une foliation bien développée.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	62,63	67,42	56,42	70,87	60,39	73,87	74,61	74,63	71,4	69,7
TiO ₂	1,15	0,91	1,46	0,52	1,14	0,23	0,62	0,25		0,62
Al ₂ O ₃	17,08	15,51	21,47	14,51	16,70	13,63	13,91	14,50	14,3	15,79
Fe ₂ O ₃	1,14	0,17	0,67	0,59	1,27	0,60	0,14	0,11	1,1	
FeO	5,73	3,61	6,54	2,48	5,59	1,46	1,40	0,97	1,1	1,67
MnO	0,11	0,02	0,13	0,06	0,07	0,02	0,02	0,02		0,03
MgO	1,39	1,96	2,43	1,19	2,99	0,22	0,60	0,53	1,2	0,83
CaO	1,87	2,53	0,75	2,31	0,98	0,68	0,67	0,77	1	1,39
Na ₂ O	2,93	3,12	1,94	4,43	3,22	3,41	3,99	4,47	3,2	4,22
K ₂ O	2,86	3,57	3,98	2,50	5,20	4,66	3,05	3,63	5	4,97
H ₂ O ⁺	2,77	1,48	4,23	0,91	1,95	0,86	1,23	0,64		1,23
H ₂ O ⁻	0,11	0,02	0,15	0,04	0,14	0,17	0,06	0,14		0,05
	99,77	100,32	100,17	100,41	99,64	99,81	100,30	100,66		100,5

Gneiss "Cheserys" : 1. Gneiss "Cheserys" biotitique (Lac Blanc)

2. Gneiss "Cheserys" à feldspath potassique (Mesure)

Gneiss "Lac Cornu" : 3. Micaschiste (Tré les Eaux) 4. Gneiss d'homogénéisation (Brévent) 5. Gneiss rubané, ruban biotitique ("Lacs Noirs") 6. Gneiss rubané, ruban leucocrate (Lacs Noirs) 7. Leptynite (Aiguillette du Brévent)

8. Gneiss leucogranitique (Lac Cornu)

Granite : 9. Protogyne - moyenne de 50 analyses CRPG Nancy 10. Granite de Vallorcine (Reinhardt et Preiswerk 1927)

Tableau 1 : COMPOSITION CHIMIQUE DE QUELQUES ROCHES CRISTALLINES
DES AIGUILLES ROUGES ET DU MONT BLANC

Minéraux principaux : quartz, plagioclases (albite oligoclase) feldspaths potassiques corrodant les plagioclases, biotite et muscovite.

Minéraux accessoires : grenat, apatite, zircon.

*** Les gneiss de type "Cheserys"**

Regroupés sur la carte avec les gneiss type "Lac Cornu" sous le terme d'anatexites, ils occupent une longue bande dont l'origine se situe, au Sud, dans la zone Lac Blanc, Lac des Cheserys et qui s'étend vers le Nord parallèlement au granite de Vallorcine (granite hercynien).

Ces roches se présentent en général comme des gneiss à biotite à grains très fins, brun violacé, dans lesquels sont disséminées de petites lentilles ou linéoles blanches effilées, constituées, soit de quartz, soit de matériau feldspathique très fin.

Les gneiss de type "Cheserys" sont le produit d'une déformation tardive des gneiss de type "Lac Cornu" au cours de la phase tectonique ancienne. Les minéraux principaux et accessoires sont les mêmes que ceux des gneiss type "Lac Cornu".

Minéraux principaux : quartz, biotite partiellement chloritisée, plagioclases acides et feldspaths potassiques.
Minéraux accessoires : grenat, zircon, apatite, pyrite, amphibolite.

C'est l'oxydation de la pyrite, présente en quantité relativement importante dans certains secteurs, qui confère à certaines parties du massif, cette couleur rouge caractéristique.

* La protogine

Elle occupe la partie sommitale du Massif du Mont-Blanc, c'est une roche de type granitique à grain grossier avec de grands cristaux de feldspaths orientés. A l'analyse, elle montre une grande homogénéité chimique.

La protogine se présente sous deux faciès :

- Un faciès très homogène, les cristaux étant de taille voisine sans orientation préférentielle.
- Un faciès orienté constitué de cristaux de taille hétérogène.

* Le granite de Vallorcine (hercynien)

Il se présente comme une roche homogène leucocrate, à texture massive non orientée et à grain moyen.

Minéraux principaux : plagioclase (oligoclase), feldspath potassique, quartz et biotite partiellement chloritisée.

Minéraux accessoires : zircon et apatite.

1.4.2 - Les roches sédimentaires

Souvent masqués par des placages de matériel cristallin colluvionné, les terrains sédimentaires affleurent de façon discontinue à basse altitude le long de la vallée de Chamonix ainsi que sur de plus vastes étendues, à ses deux extrémités. Ils sont constitués par des gypses du Trias, des calcschistes du Lias, des calcaires durs du Lias et du Jurassique, des schistes ardoisiers, des grès et conglomérats du Carbonifère et des schistes siliceux du Permien.

Conclusion

Les Massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges sont essentiellement formés de roches cristallines acides. Cependant, si les minéraux constitutifs des différentes roches sont semblables, leur pourcentage relatif dans chaque faciès de roche est assez variable de sorte que leur composition chimique l'est aussi. Lors de la mise en place des couvertures meubles, ces roches ont été associées et mélangées. De ce fait, si l'on considère la composition chimique et minéralogique des formations superficielles, il semble qu'elles soient globalement assez homogènes, mis à part celles de la zone sommitale ainsi que certaines moraines (Plan de l'Aiguille), plus acides et de texture plus grossière, et certains éboulis localisés, formés aux dépens d'une roche particulière (micaschiste, gneiss pyriteux).

1.5 - NATURE ET REPARTITION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Cinq grands secteurs peuvent être distingués dans la vallée de Chamonix (Fig. 2).

- **Le fond de vallée** apparaît généralement plat. Dans le sens de la longueur, il est constitué de trois gradins successifs encombrés chacun de débris fluvio-glaciaires et lacustres et séparés les uns des autres par des seuils morainiques édifiés au tardiglaciaire par les glaciers d'Argentière et de la Mer de Glace. Lors du petit âge glaciaire (1600-1860), ces grands glaciers ont déposé là de petites moraines frontales et latérales dont certaines sont bien conservées.

- **Les parois de l'"auge"**, abruptes et boisées sont sillonnées par de nombreux couloirs d'avalanche. Si certains couloirs, dont le tracé est souligné par une végétation particulière, forment à leur pied un cône caractéristique

qui témoigne d'avalanches répétées et systématiques, d'autres fonctionnent très épisodiquement, de sorte qu'ils sont recolonisés par la forêt entre deux avalanches (avalanches cinquantenaire à centenaire). Ainsi, lors de notre séjour, deux avalanches d'un front de plusieurs centaines de mètres de largeur chacune, ce qui est sans rapport avec la taille très étroite des couloirs préexistants dans la forêt, ont balayé ces pentes, arrachant les arbres, dénudant et décapant le sol par endroit, le recouvrant d'une épaisseur importante, de colluvions à d'autres. Les cartes d'avalanches (cartes ZERMOS) confirment que la quasi totalité de ces pentes ont été affectées par des avalanches.

Les colluvions remaniées par les avalanches forment donc l'essentiel des couvertures meubles de ces pentes.

Sur le versant Aiguilles Rouges subsistent de nombreux petits becquets rocheux qui alimentent la pente en éboulis grossiers. Cependant, bon nombre de ces éboulis inserrés dans la forêt sans amont rocheux évident, semblent "fossiles".

Enfin, les formations d'origine glaciaire sont rares sur ces pentes, mises à part quelques moraines récentes des grands glaciers.

- Les cirques glaciaires s'étagent entre les cotes 1800 et 2500 m. Si leur partie supérieure est encore généralement occupée par des glaciers côté Mont-Blanc, en revanche, la plupart de ceux-ci ont disparu dans les Aiguilles Rouges. Le fond de ces cirques se trouve en général à une altitude proche de 2000 m formant des "épaulements" discontinus que l'on a pu interpréter comme des témoins d'une ancienne vallée glaciaire, parallèle à la vallée actuelle. Cependant les relations étroites liant la forme des cirques, la surface de leur bassin d'alimentation et la dureté des

roches qui s'y trouvent, ainsi que la conservation des cloisons rocheuses entre les cirques s'opposent à cette hypothèse (VEYRET, 1968).

En pente généralement faible, le fond des cirques est le plus souvent encombré par des témoins morainiques tardiglaciaires. Les moraines latérales lorsqu'elles sont en pente faible, sont généralement bien conservées, les moraines frontales ont été emportées par les eaux de fonte des glaciers.

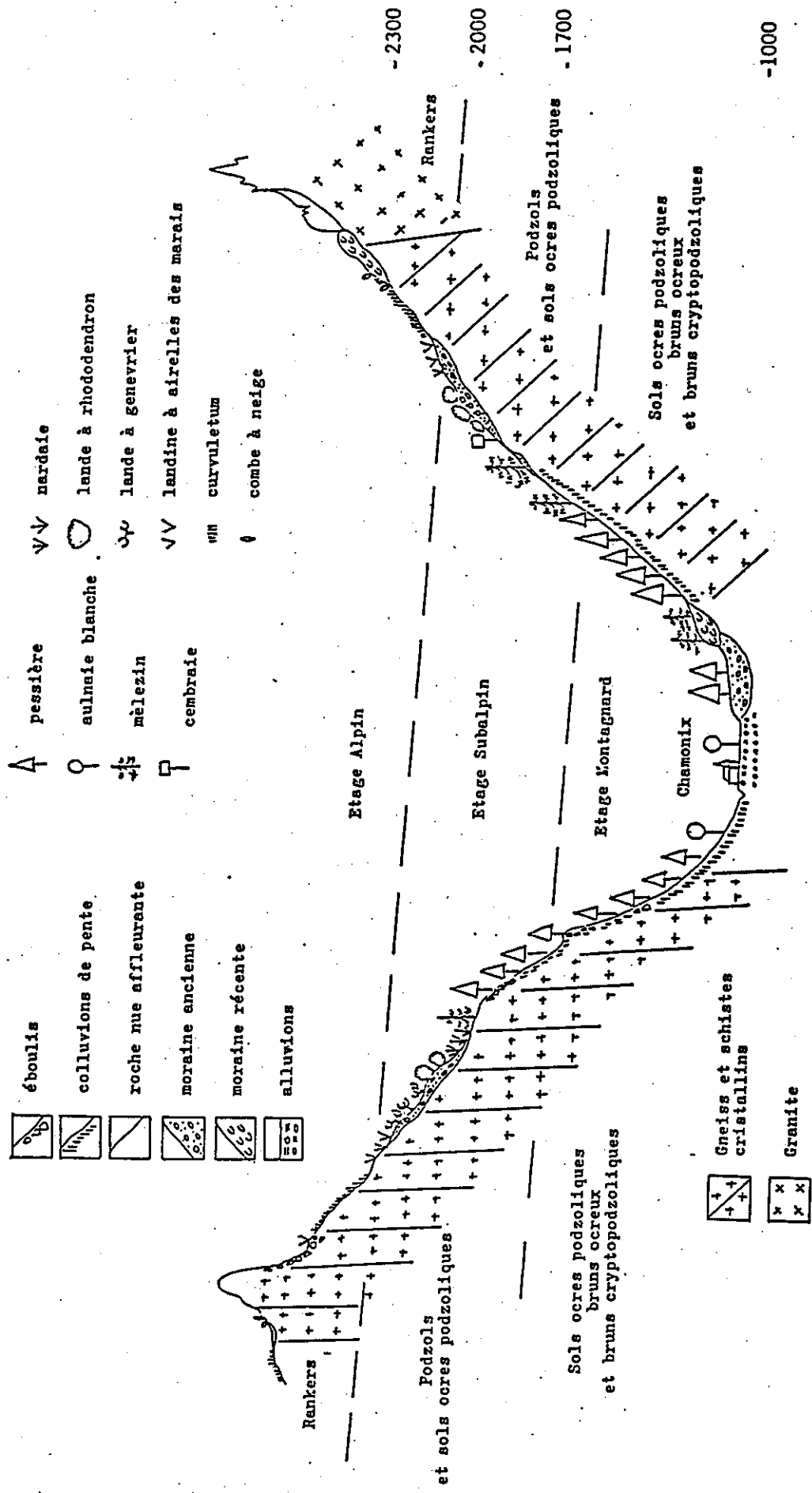
Dans les Aiguilles Rouges, la transition entre les cirques glaciaires et les parois de l'"auge" se fait par une longue barre rocheuse qui alimente la pente aval en éboulis généralement grossiers.

Les bassins d'alimentation des cirques, en pente plus forte, forment l'ancienne zone d'abrasion des glaciers. C'est là que les surfaces de roches moutonnées, polies par les glaciers sont les plus vastes. Cependant, suivant la taille et la morphologie des cirques, celles-ci peuvent être masquées par des formations morainiques glissées, solifluées, ou des épandages fluvio-glaciaires. Côté Mont-Blanc le haut des cirques est le plus souvent occupé par des formations morainiques récentes (-150 ans BP) au-dessus desquelles sont suspendus les glaciers actuels. Sur le versant des Aiguilles Rouges par contre, les formations morainiques récentes, très marginales, ne sont pas venues masquer les vastes surfaces de gneiss moutonnés.

Entre les cirques subsistent des cloisons et des becquets rocheux qui alimentent les pentes en éboulis de divers calibres, souvent repris par des avalanches.

- La zone sommitale est généralement occupée, dans le Massif du Mont-Blanc, par les glaciers. A leur pied sont édifiées de puissantes moraines datant des dernières

Fig. 2 : Répartition de la végétation,
des formations superficiels et des sols
le long d'un transect perpendiculaire à la vallée de CHAMONIX



fluctuations climatiques (1600-1860). Quelques arêtes non englacées forment des chaos de blocs sous l'action du gel. Dans les Aiguilles Rouges, les crêtes et arêtes rocheuses sont reliées aux cirques glaciaires par des éboulis actifs parfois frangés par une moraine de névé.

- Les bouchons sédimentaires, situés aux deux extrémités de la vallée se différencient nettement de l'ensemble cristallin : si les placages cristallins glaciaires sont abondants, la roche en place affleure néanmoins sur de vastes surfaces en altitude. Le modelé est alors fonction des caractères de ces roches : versants soliflués sur les schistes du Lias, lapiaz dans les calcaires durs, dépressions et dolines dans les gypses du Trias.

1.6 - HYDROLOGIE : "La carence du ruissellement" (P. VEYRET, 1959)

La vallée de Chamonix est drainée par l'Arve, dont la source se situe dans les terrains sédimentaires, à proximité du Col de Balme. Au-delà du Col des Montets, l'Eau Noire draine l'extrémité orientale du massif vers le Rhône.

Si l'on cherche l'origine réelle du débit de ces rivières, on constate qu'elles sont essentiellement alimentées par les eaux provenant de la fonte des glaciers, des névés ou du trop plein des lacs, et non pas des sources ou des eaux de ruissellement.

Mises à part quelques sources profondes et permanentes, disséminées à basse altitude (Parsaz, Floria), la montagne apparaît sèche, même après de fortes pluies. L'absence de formes d'érosion torrentielles, autre que glaciaires, en témoigne.

Cette véritable carence du ruissellement s'explique par l'importance et l'épaisseur des formations superficielles

filtrantes, et par la multiplicité des fissures et diaclases qui affectent la roche en place. Les creusements de tunnels sous le massif du Mont-Blanc ont d'ailleurs permis d'observer l'infiltration profonde et rapide d'eaux météoriques (JAMIER, 1972). Seule la face Nord des Aiguilles Rouges semble échapper partiellement à cette sécheresse, essentiellement du fait de la rareté des formations superficielles fragmentées et de l'abondance des polis glaciaires sur ce versant.

1.7 - CONCLUSION

La vallée de Chamonix, creusée dans les terrains sédimentaires qui affleurent à ses deux extrémités, sépare deux puissants massifs alpins, Mont-Blanc et Aiguilles Rouges, formés de roches cristallines acides, granite et gneiss.

L'érosion glaciaire et post-glaciaire, guidée par le bâti structural, sont à l'origine d'un profil particulier, grossièrement symétrique par rapport à l'axe de la vallée et que l'on peut aisément subdiviser en quatre grands secteurs morphologiques. Dans chacune de ces unités se distinguent des formations superficielles dominantes :

- Formations morainiques anciennes et récentes, et dépôts fluvioglaciaires et lacustres dans le fond de vallée.
- Colluvions d'éboulis et d'avalanches sur les pentes abruptes qui dominent le fond de vallée.
- Formations morainiques anciennes dans les cirques glaciaires et roches moutonnées à leur partie supérieure.
- Moraines récentes et éboulis actifs de la zone sommitale.

Cet étagement des formations superficielles dominantes constitue un facteur fondamental de la distribution des sols.

L'épaisseur des couvertures fragmentées et l'importante fissuration des roches cristallines explique par ailleurs la sécheresse superficielle de ces massifs.

2. CADRE CLIMATIQUE

Protégée par le Massif du Mont-Blanc, la vallée de Chamonix fait transition, par son climat, entre les Alpes externes très humides (Bornes, Chablais) et la zone interne nettement plus sèche (Valais)(Tableau 2).

Les données présentées (RICHARD, 1975) proviennent de plusieurs réseaux climatologiques parallèles (E.D.F., D.D.A., Météorologie Nationale) qui couvrent la région.

2.1 - LES PRECIPITATIONS

Provenant de l'Ouest en général, elles remontent la vallée, arrosant abondamment les hauts reliefs qui l'encadrent. Leur total annuel augmente irrégulièrement avec l'altitude selon l'orientation et la position des versants (Tableau 3) : de 1200 mm environ en fond de vallée, la pluviométrie oscille entre 1700 et 2100 mm à l'étage subalpin, entre 2 et 3 m à l'étage alpin (l'interprétation stricte des mesures à haute altitude est aventureuse). Des carotages effectués dans la glace des zones sommitales permettent de penser que les précipitations annuelles passent par un maximum vers 4000 m et diminuent au-delà. (REYNAUD, communication personnelle, 1984).

La variabilité stationnelle des précipitations à altitude constante va de pair avec une forte variabilité

Unités géographiques	Lithologie	Climatologie	Peuplements caractéristiques
Massifs subalpins	Calcaires dominants	Précipitations abondantes. Étés frais.	Montagnard avec Hêtre et Sapin
Massifs cristallins externes	Gneiss, Granites	Précipitations encore abondantes en altitude, plus faibles dans les dépressions. Rivières froides.	Mélèze et Pin Cembro dans le Subalpin
Massifs internes	Gneiss, Flyschs	Précipitations faibles.	Epicéa montagnard, Mélèze abondant.

Tableau 2

GRANDES DIVISIONS ECOLOGIQUES DES ALPES (d'après Richard, 1975)

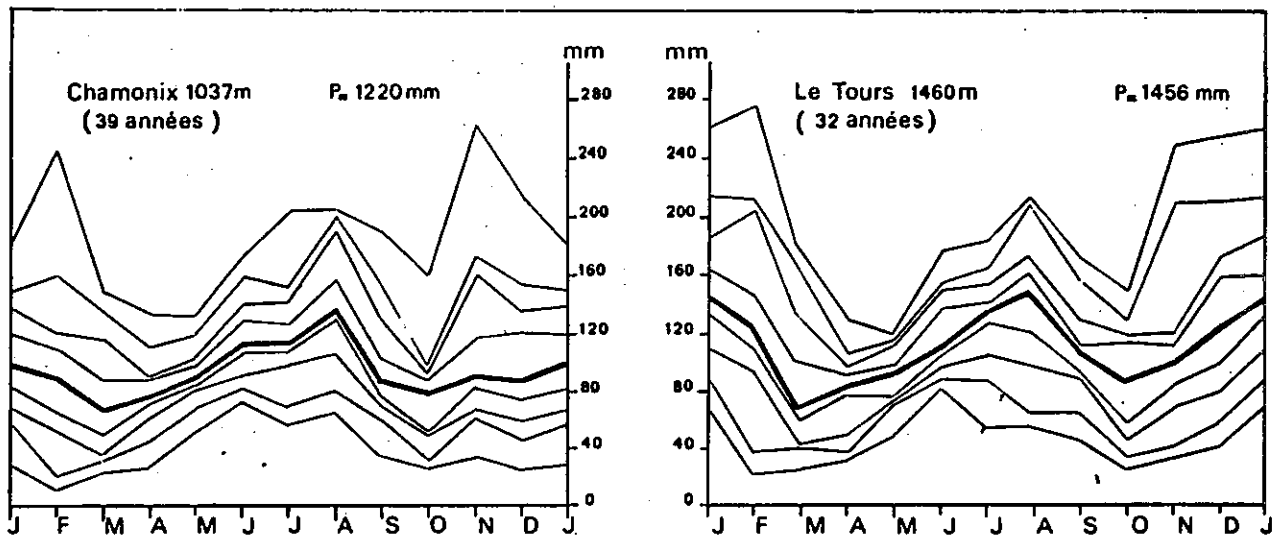


Figure 3 : VARIATIONS MENSUELLES DES PRECIPITATIONS
(médiane en trait gras), valeur des 4 décimales
. les supérieurs et inférieurs en trait fin.

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	A
Chamonix 1050 m	-2,3	-2,1	0	5,4	10,3	12	15,4	15,4	11,2	6,8	1,5	-3,3	6,1
Planpraz 2000 m	-2,5	-4,6	-2,3	0	5,2	7,9	11,6	11,6	8,6	4,6	0	-1,8	3,2
Brévent 2525 m	-5,2	-8,4	-6,9	-4,5	0,1	3,1	6,4	7,1	4,3	-	-	-4,3	-
Gradient Chamonix-Planpraz	0,02	0,26	0,24	0,57	0,53	0,43	0,45	0,40	0,27	0,23	0,16	-0,16	0,30
Gradient Chamonix-Brévent	0,20	0,42	0,46	0,67	0,69	0,60	0,61	0,56	0,46	-	-	0,1	-
Gradient Planpraz-Brévent	0,51	0,72	0,87	0,86	0,97	0,91	0,89	0,85	0,81	-	-	0,47	-

Tableau 4

MOYENNES THERMIQUES MENSUELLES ET GRADIENTS THERMIQUES (1969-1974)

interannuelle : ceci se traduit par une succession d'étés secs et d'étés pourris qui font la joie des chamoniards !

La répartition mensuelle de la pluviométrie (Fig.3) montre un maximum d'été auquel s'ajoute, en altitude, un maximum d'hiver. Du fait des basses températures, les précipitations se font pour une part importante sous forme de neige : le manteau neigeux recouvre le sol durant quatre à cinq mois en fond de vallée, six à sept mois à 2000 m, entre sept et onze mois à l'étage alpin (2200 à 2500 m).

Toutes les précipitations sont solides au-dessus de 4000 m. L'allongement de la durée d'enneigement avec l'altitude se traduit, par ailleurs, par une diminution du nombre des saisons : quatre saisons distinctes à l'étage montagnard, trois saisons (le printemps disparaît sous la neige) à l'étage subalpin, deux saisons contrastées, été et hiver, à l'étage alpin.

2.2 - TEMPERATURES

Lorsque l'on s'élève en altitude, la diminution de la pression atmosphérique entraîne un refroidissement général (Tableau 4). De l'ordre de 6,5°C à Chamonix, la température moyenne annuelle s'abaisse suivant un gradient d'environ 0,3 à 0,7°C par 100 m, variable suivant l'orientation des versants. Le tableau 4 présente certaines valeurs de ce gradient pour un transect en face Sud. On note en automne de fréquentes inversions de températures.

2.3 - CONCLUSION

Le climat de la vallée de Chamonix, froid et pluvieux dans ses grandes lignes, est nuancé par une forte variabilité interannuelle. L'étagement bioclimatique altitudinal, "La tyrannie de l'altitude", s'exprime très généralement par l'augmentation des précipitations et par

l'abaissement des températures lorsque l'on s'élève. Elle détermine l'étagement de la végétation et des sols et règle les activités humaines.

Cependant, ces grandes tendances ne se vérifient que pour de forts dénivelés et s'expriment différemment selon l'orientation et la position des stations : nous verrons que les microclimats stationnels, dont dépendent les pédoclimats (cf. Chapitre III) vont venir moduler cet étagement général.

Par ailleurs, ce climat n'a pas toujours été celui que nous connaissons aujourd'hui ; des périodes de réchauffement ont alterné, depuis la fonte des calottes glaciaires avec des périodes plus froides que l'actuelle. Dernière en date, le petit âge glaciaire, 1600-1860, marqué par l'avancée historique des grands glaciers alpins, est apparu pour des températures moyennes annuelles inférieures de 0,5 à 1°C à l'actuelle (LEROY LADURIE, 1983).

TABLEAU 3
Données climatiques (RICHARD, 1975)

Station	Altitude	Précipitations moy.ann.	Températures moy.ann.	Nombre de jour neige au sol	Source
Les Houches	1010m	1300mm	7,2°C	122	Météo
Chamonix	1040m	1261mm	6,5°C		Météo
Vallorcine	1264m	1396mm	5,6°C	144	Météo
Le Tour	1431m	1456mm	5,6°C		Météo
Eosson	1800m	1810mm			EDF
Lac Barberine	1900m	2240mm		198	EDF
Lognan	2060m	1714mm			DDA
Le vieil Eosson	2170m	2600mm			EDF

3. VEGETATION (RICHARD, 1975)

De par son matériel floristique, la vallée de Chamonix est intermédiaire, entre les Alpes externes et internes. La végétation qui couvre ses flancs peut être subdivisée en étages, facilement identifiables dans le paysage, et constitués par des ensembles écologiques déterminés par les conditions macroclimatiques. A l'intérieur de chaque étage les nuances microclimatiques et stationnelles sont prises en compte par l'étude des séries de végétation et des groupements spécialisés (Fig.2).

Etage montagnard : à la hauteur de Chamonix, il occupe environ les deux tiers inférieurs des fortes pentes boisées qui encadrent la vallée. C'est le domaine de la pessière à myrtille, sombre et dense, à sous bois clairsemé, relativement pauvre en espèces. Melanpyre des bois, la canche flexueuse, la luzule blanc de neige dominant en Adret, l'oxalis petite oseille et le prenanthe pourpre en Ubac. Ces peuplements forestiers sont périodiquement ravagés par des avalanches. Le mélèze, espèce pionnière, colonise ces chablis ainsi que les moraines récentes des grands glaciers. Les couloirs avalancheux sont colonisés par l'aulnaie verte en face Nord, et par des éboulis secs à bouleau et noisetier en face Sud.

Etage subalpin : c'est l'étage des éricacées. La transition avec le montagnard est lente, la végétation du montagnard s'enrichissant en éricacées au fur et à mesure que les pessières deviennent plus clairiérées. En face Sud apparaissent les espèces plus xérophiles de la lande, callune, airelle rouge, genévrier, raisin d'ours remplacés en ubac par l'airelle des marais et le rhododendron. Cette évolution se maintient en adret jusque sur les rebords des cirques glaciaires, où la pessière disparaît au profit des landes.

Le mélezin, qui n'existe qu'en lambeaux en adret, constitue par contre une large bande en ubac entre 1700 m et 2000 m. Cette forêt claire, mêlée de pin cembro couvre un sous-bois dense d'éricacées, de rhododendron, de myrtille et d'airelle des marais.

Les cirques glaciaires, entre 1900 m et 2200 m sont colonisés par des landes. Aux orientations plus fraîches (ubac et pentes orientées à l'Est de l'adret) sont associées des landes à rhododendron, nettement dominées par les éricacées. Aux orientations plus chaudes (pentes exposées au Sud et à l'Ouest de l'adret) se développent des landes à genévrier, marquées par une strate herbacée assez abondante. L'homme a anciennement transformé ces landes arborées en pâture. L'abandon récent de ces pratiques a permis la réinstallation des landes. Seules subsistent actuellement quelques pelouses à nard et canche flexueuse, sur le fond des cirques glaciaires. Enfin, sur les "crêtes ventées", particulièrement exposées aux rigueurs de l'hiver, se développent des landines à azalée naine.

Etage alpin : c'est l'étage des pelouses. Diverses associations végétales se partagent le paysage suivant la durée de l'enneigement. Pelouses à laiche courbée sur les pentes faibles à enneigement durable, pelouses à laiche toujours verte et fétuque de Haller sur les affleurements rocheux accidentés, végétation des "combes à neige", Alchenille à cinq folioles, saules nains, Polytric sexangulaire dans les cuvettes à déneigement tardif.

4. CONCLUSION

La variation en fonction de l'altitude des caractères du climat, de la végétation, et des formations superficielles dominantes, constitue le trait majeur de la région étudiée.

L'étagement bioclimatique détermine un étagement des sols, caractéristique de l'ensemble des Alpes françaises sur roches acides (LEGROS et CABIDOCHÉ, 1977) :

Rankers de divers types sous pelouse à l'étage alpin, podzols et sols ocres podzoliques sous les landes de l'étage subalpin, sols ocres podzoliques et brun ocreux sous les pessières montagnardes.

Cependant, la présence de formations superficielles étagées, d'âge varié, inégalement distribuées sur des versants dont l'exposition est différente complique singulièrement cet étagement.

Face à cette diversité et à cet étagement, nous avons orienté notre travail suivant les deux objectifs suivants :

- Préciser quels sont les grands facteurs qui déterminent la morphologie et la répartition des sols à chaque étage. Pour cela, nous avons adopté une démarche cartographique à différentes échelles. Ceci nous a permis de dégager des relations générales : sols-milieus.

- Analyser les mécanismes par lesquels l'étagement bioclimatique altitudinal se traduit par un étagement des sols. Pour cela, nous avons étudié de manière approfondie, le fonctionnement biogéochimique d'une séquence de sols représentatifs. Ceci nous a conduit à préciser dans quatre cas particuliers, les relations actuelles : sol-climat-végétation.

C H A P I T R E I I

The first part of the paper discusses the importance of the research and the objectives of the study. It then presents a literature review of the existing research on the topic. The second part of the paper describes the methodology used in the study, including the data collection and analysis techniques. The third part of the paper presents the results of the study, and the fourth part discusses the conclusions and implications of the findings.

The study was conducted using a quantitative research design. Data was collected from a sample of 100 participants, and the results were analyzed using statistical software. The findings of the study indicate that there is a significant relationship between the variables being studied.

The results of the study suggest that the research has important implications for the field. Further research is needed to explore the relationship between the variables in more detail.

In conclusion, the study has provided valuable insights into the topic and has contributed to the existing body of knowledge. The findings have important implications for the field and suggest that further research is needed.

CHAPITRE II

LES SOLS DE LA VALLEE DE CHAMONIX

RECHERCHE DES RELATIONS GENERALES : SOLS-MILIEUX

Introduction

La répartition altitudinale des sols dans la vallée de Chamonix a été décrite, dans ses grandes lignes, par LEGROS et CABIDOCHÉ (1978). Leur analyse, affinée par CABIDOCHÉ (1979) dans les Hautes Pyrénées, insiste sur la nécessité de dépasser la simple description des formes morphologiques pour s'intéresser aux caractères fonctionnels des différentes roches-mères qui composent ces formes. C'est dans la même optique que nous avons envisagé cette partie de notre travail.

Par ailleurs, la caractérisation analytique et minéralogique des sols de la vallée de Chamonix a déjà fait l'objet d'un travail approfondi basé sur l'examen d'une quinzaine de profils répartis dans le Massif du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (PELISSONNIER, 1978 ; ROBERT et al., 1980).

Les conclusions des auteurs sont les suivantes :

- La granulométrie des sols, variable suivant la roche-mère, est généralement plus fine (limono-argileuse à

argilo-limoneuse) dans les rankers de l'étage alpin que dans les podzols de l'étage subalpin (sableuse à sablo-limoneuse).

- Aux étages subalpins et alpins, les taux de saturation des sols sont inférieurs, en général, à 25 % et l'acidité d'échange, titrée dans une solution KCl, est supérieure à 85 % ce qui, d'après ESPIAU (1978) indique que le processus le plus répandu, même s'il ne se traduit pas toujours dans la morphologie, est la podzolisation.

- L'étude des teneurs en aluminium et fer libre des profils concorde très généralement avec les données minéralogiques : les minéraux interstratifiés (10-14 A) et la vermiculite apparaissent dans les horizons de départ appauvris en fer et aluminium, tandis que les minéraux intergrades dominent dans la fraction argile des horizons d'accumulation de fer et aluminium libre.

Le contexte dans lequel nous travaillons dicte notre plan : nous commencerons par présenter les sols des altitudes les plus élevées (étage alpin), ensuite ceux des régions intermédiaires (étage subalpin), enfin, ceux des zones relativement basses (étage montagnard).

Pour chaque étage bioclimatique, nous présentons succinctement la répartition des sols sur les versants du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, puis nous décrivons chaque type de sol en nous limitant à ses caractères les plus importants et les plus directement en relation avec le fonctionnement du sol. Les descriptions classiques associées aux analyses complètes sont placées en annexe. Les facteurs du milieu qui sont spécifiques de chaque type de sol sont dégagés. Cette analyse débouche à chaque étage sur l'établissement de tableaux commentés des relations générales : sols-milieus.

Remarque : Les noms que nous avons attribués aux sols en fonction de leur simple morphologie sont généralement formés d'un "radical" tiré de la classification française des sols (C.P.C.S., 1967) et d'un adjectif ou d'une périphrase qui permet de les différencier les uns des autres lorsque c'est nécessaire. Ces noms ne constituent pour nous qu'une simple référence.

1. LES SOLS DE L'ETAGE ALPIN

Caractères généraux et logiques de distribution

1.1 - REPARTITION DES SOLS DANS LE PAYSAGE

Les figures 4 et 5 situent les principaux types de sols en fonction du modelé de chaque versant. Les formes du relief sont intentionnellement exagérées. Les deux versants se distinguent essentiellement par l'inégale répartition des formations superficielles due à la présence de glaciers actifs côté Mont-Blanc.

Nous distinguerons à priori les sols sur roche massive de ceux différenciés sur des substrats fragmentés. En effet, CABIDOCHÉ (1979) a pu montrer la pertinence de cette distinction pour analyser la pédogénèse des milieux de haute montagne.

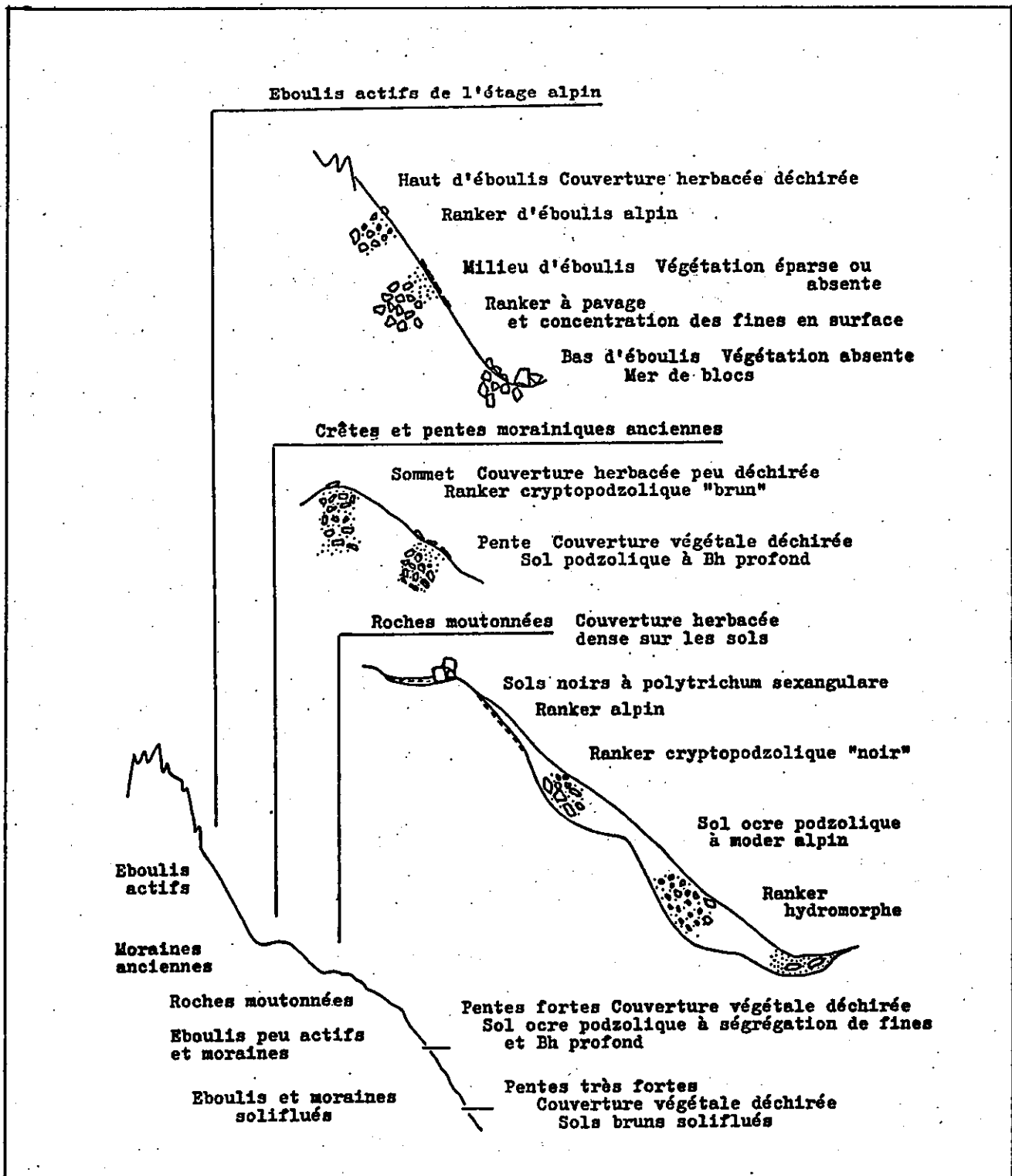


Figure 4 : Répartition des sols à l'étage alpin, versant Aiguilles Rouges

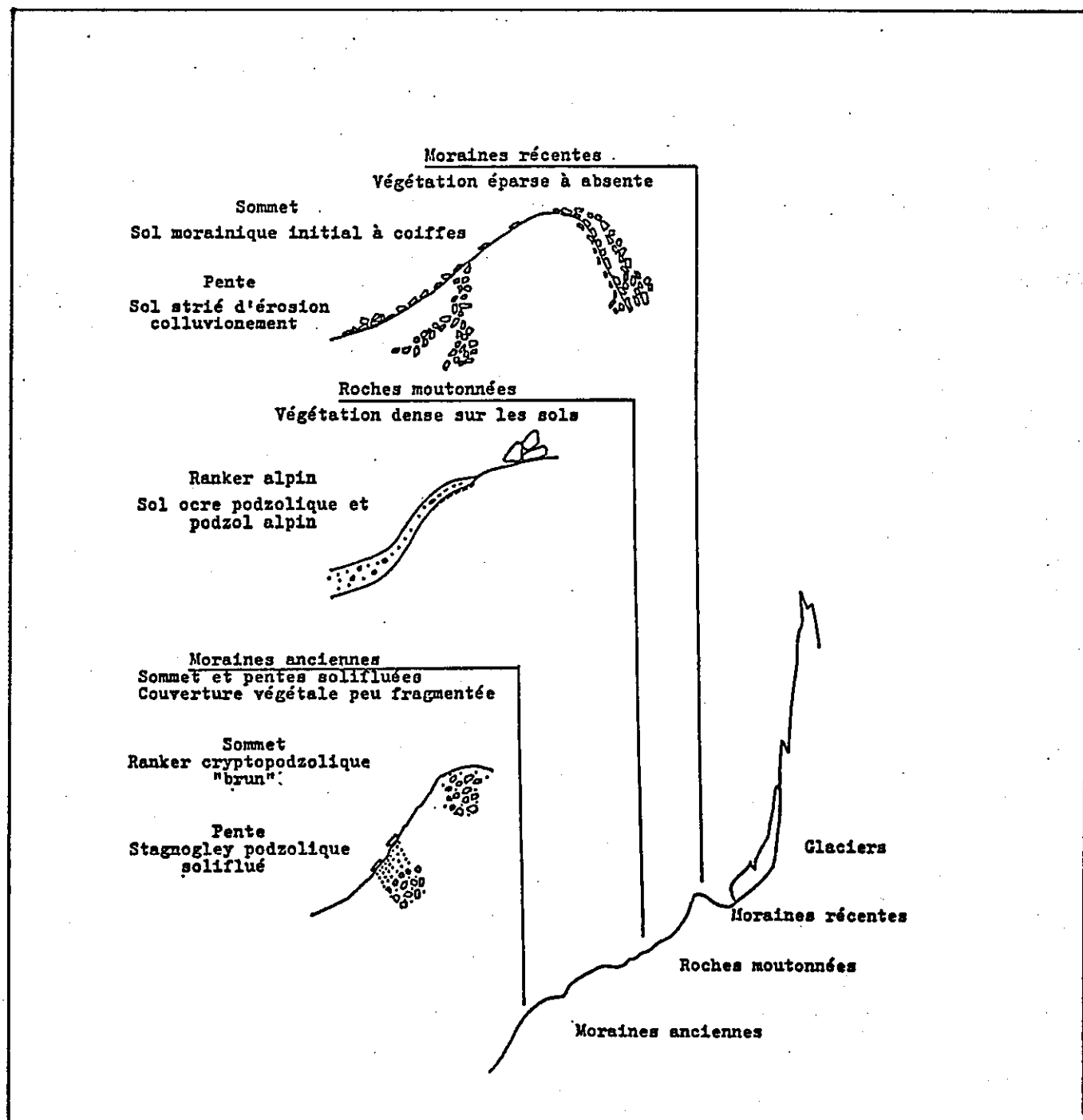


Figure 5 : Répartition des sols à l'étage alpin versant Mont Blanc

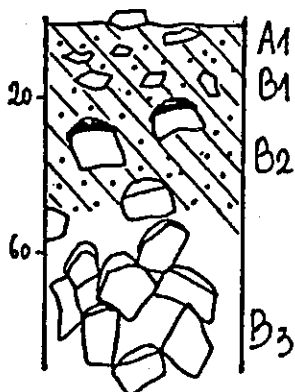
1.2 - LES SOLS DIFFERENCIÉS SUR DES SUBSTRATS FRAGMENTÉS

Ils occupent la majorité de la superficie de cet étage.

1.2.1 - Les rankers d'éboulis alpins

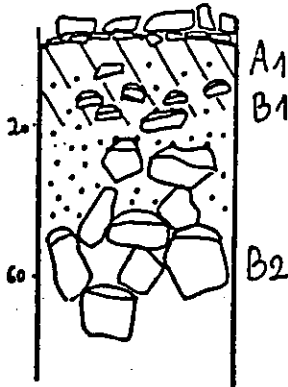
Ces sols s'observent dans les éboulis actifs qui sont alimentés par les arêtes rocheuses découpées du Massif des Aiguilles Rouges. Ils sont rares dans le Massif du Mont -Blanc du fait de la présence des glaciers. Trois types de sols peuvent être différenciés suivant leur position dans l'éboulis :

- Les rankers ocreux d'éboulis alpins occupent le centre et le haut des cônes d'éboulis et sont colonisés par une pelouse déchirée à *Calamagrostis tenella*.



L'horizon A₁, brun foncé, est constitué d'un laci¹s dense de racines incorporant de nombreux graviers. L'horizon B₁, brun jaunâtre coloré, enrichi en fer libre, présente une structure microagrégée bien exprimée, exploitée par de très nombreuses racines. Il comporte de très nombreux graviers et cailloux uniformément sales. En B₂ ces éléments grossiers présentent sur leur face supérieure des dépôts brun -jaunâtre de quelques mm d'épaisseur faiblement adhérents, à structure grossièrement parallèle à la pente (coiffes). La matrice, à structure grumeleuse à polyédrique subanguleuse, devient de moins en moins abondante, en descendant. En B₃ subsistent seules les coiffes reposant sur des éléments grossiers très nombreux, délimitant des vides "caverneux" d'entassement.

- Les rankers à pavage et concentration des particules fines en haut du profil apparaissent en milieu d'éboulis. La végétation est alors clairsemée ou absente. Ces sols présentent des analogies avec ceux décrits par V. VERGES (1982) sur le Mont Ventoux.



Le sol est couvert d'un pavage de cailloux propres sous lequel on observe une accumulation de graviers propres aussi. L'horizon A_1 , brun, riche en graviers, pauvre en cailloux, présente une structure lamellaire grossièrement parallèle à la pente. L'horizon B_1 , brun vif coloré, présente à la face supérieure des éléments grossiers des coiffes dont la limite supérieure porte des grains minéraux propres. Les vides d'entassement entre les éléments grossiers, toujours coiffés deviennent très abondants en B_2 .

- En bas d'éboulis, les blocs et cailloux dominent. On observe alors des chaos de blocs, non colonisés par la végétation.

Ce type de répartition des éléments fins par rapport aux éléments grossiers le long d'un versant s'observe plus rarement sur les éboulis remaniés par les avalanches ou sur les éboulis très grossiers.

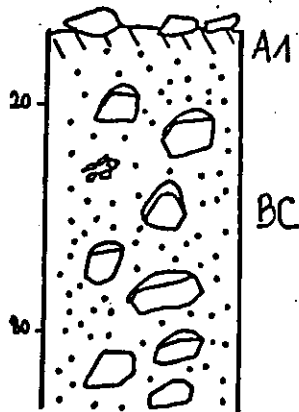
La distribution des éléments fins dans les sols résulte d'un équilibre entre l'apport par le haut et le soutirage en profondeur. La colonisation par la végétation amplifie les différences dans la mesure où les racines facilitent la rétention des fines. La présence de grains minéraux lavés à la face supérieure des coiffes couvrant les éléments grossiers des sols en milieu d'éboulis donne à penser que l'équilibre est actuellement déplacé vers le soutirage.

Par ailleurs, les coiffes et les pavages pourraient témoigner d'une mise en place des matériaux dans un climat froid soumis au gel (Van VLIET LANOE, 1982).

1.2.2 - Sols initiaux des moraines récentes

Ces sols s'observent sur les moraines latérales et frontales récentes (-150 ans environ) qui occupent des surfaces assez importantes dans le Massif du Mont-Blanc.

- Sols morainiques initiaux à coiffes. Ils s'observent sur les sommets et les pentes faibles externes peu érodées des moraines sous une végétation clairsemée.



Sous un micro-horizon A_1 , brun grisâtre on observe un matériau meuble constitué d'une alternance de lentilles plus limoneuses, beige jaunâtre et de zones plus sableuses blanchâtre. Les éléments grossiers sont coiffés par des dépôts hétérogènes assez compacts. Leur face inférieure est propre et repose sur des sables lavés délimitant de petits vides d'entassement. En descendant les coiffes deviennent rares. En profondeur les éléments grossiers sont englobés dans une matrice hétérogène, compacte et friable.

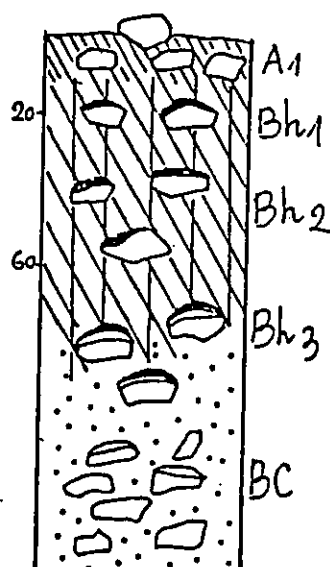
- Sols striés d'érosion/colluvionnement

Les pentes internes des moraines latérales sont particulièrement raides. Leur érosion se fait généralement en lignes parallèles à la pente et délimite des alignements irréguliers d'éléments grossiers le long de la pente. Entre ces alignements apparaît le matériau morainique initial. En bas de pente ces alignements se rejoignent pour former une "nappe" d'épandage.

Les pentes externes plus douces présentent des concentrations d'éléments grossiers dans des lits, et d'éléments fins en épandage, consécutifs aux divagations des eaux de fonte printanières.

1.2.3 - Rankers cryptopodzoliques "bruns"

On les observe dans les Massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, sur les crêtes et pentes faibles des moraines anciennes et sous une couverture herbacée, peu à moyennement déchirée (pelouse à *Carex curricula*, *Leontodon pyrenaïcus*).



L'horizon A₁, brun clair à structure grumeleuse comporte de nombreux éléments grossiers uniformément sales. En Bh₁, la face supérieure des éléments grossiers est revêtue d'un enduit brun noir tandis que la face inférieure apparaît propre. La matrice brun foncé grumeleuse devient brun jaunâtre au fur et à mesure que l'on descend. En Bh₃, les éléments grossiers sont coiffés par des dépôts minéraux bruns jaunâtres à la face supérieure desquels on observe des enduits bruns foncés. Dans la matière minérale et à la face inférieure des éléments grossiers apparaissent des vides d'entassement. En profondeur, le matériau de plus en plus clair, présente une structure grossièrement parallèle à la pente. L'horizon Bc morainique compact et fragile présente quelques coiffes sur les éléments grossiers qui disparaissent en profondeur.

Ces sols apparaissent assez uniformément et profondément bruns et présentent dans les horizons Bh une accumulation de fer et d'aluminium libre d'où leur dénomination de cryptopodzolique. Le matériau morainique à coiffes apparaît en profondeur, revêtu par des dépôts organiques.

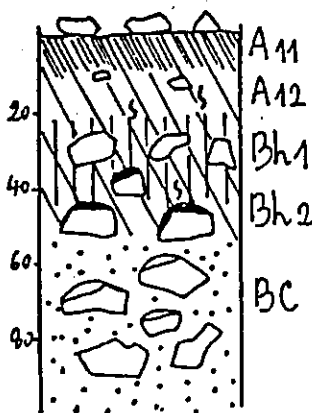
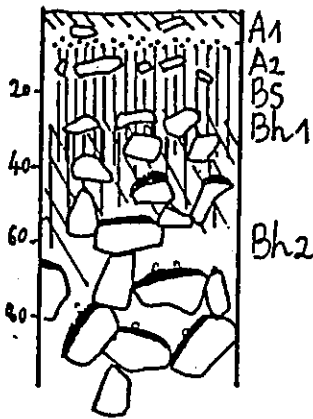
1.2.4 - Sols podzoliques à Bh profonds

Ces sols s'observent sur les pentes fortes des moraines ébouleuses ou des éboulis peu actifs de l'étage alpin sous des couvertures végétales plus ou moins déchirées. (Le qualificatif d'ébouleux désigne les matériaux non stabilisés qui subissent le même type de remaniement que les éboulis).

Ce sol différencié dans un éboulis, est constitué de deux ensembles :

- Une séquence d'horizons podzoliques A₁, A₂, Bs différenciés dans un matériau fin à surstructure massive.

- Des horizons Bh très grossiers et meubles à structure grumeleuse et cailloux uniformément sales. En profondeur, les cailloux portent des coiffes, minérales hétérogènes, brunâtres foncées, qui présentent à leur face supérieure des grains minéraux lavés, ce qui laisse penser que leur formation n'est pas actuelle. L'enracinement est très dense jusqu'en Bh. Les teneurs en matière organique (14 %) et en aluminium libre sont maximales en Bh.



Différencié dans une moraine ébouleuse, ce sol présente les deux ensembles précédents, mais moins accentués :

- Un horizon brun clair grisâtre, fin, légèrement argileux et présentant quelques gainages racinaires.

- Des horizons Bh très grossiers évoluant en profondeur vers un matériau morainique à coiffes. L'enracinement est très dense jusqu'en Bh₂.

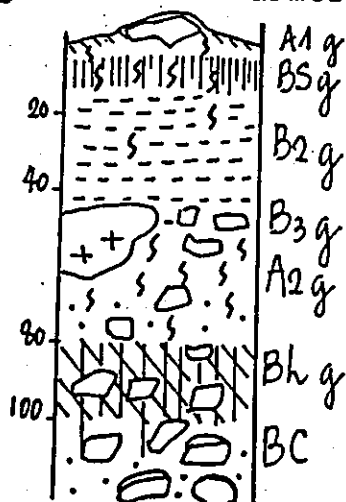
On observe sur les pentes morainiques tous les intermédiaires entre ces sols et les rankers bruns cryptopodzoliques.

Ces sols ont été rassemblés sous la même dénomination du fait de la séquence d'horizons A₂ fin / Bh grossier caractéristique. Le caractère très grossier des horizons Bh les distingue des sols à horizon noir alumineux profonds décrits dans le Massif Central par de nombreux auteurs (WAREMBOURG, 1969, 1973 ; BOROT, 1984). Si pour certains profils, la superposition de matériau est possible,

l'existence de telles différenciations granulométriques dans des sols non encore stabilisés (ranker d'éboulis alpin, sols morainiques initiaux) renforce l'hypothèse d'un pédogénèse en place.

1.2.5 - Stagnogleys podzoliques soliflués

Ils s'observent à la périphérie de certains moraines du Massif du Mont-Blanc (Lognan) sous une végétation herbacée caractéristique d'un long enneigement (combe à neige). Les pentes moyennes à fortes, légèrement concaves, sont couvertes de petits bourrelets de solifluxion, d'échelle métrique, généralement armés par des blocs.



Le sol est constitué de 2 ensembles :

- Une séquence d'horizons hydromorphes A_{1g}, B_{sg}, B_{2g} de texture limono-sableuse sans éléments grossiers. L'horizon B_{sg} ocre présente une accumulation en fer libre.
- Une séquence d'horizons hydromorphes de texture sableuse comportant de nombreux éléments grossiers. L'horizon B_{hg} brun ocre évoluant en profondeur vers un matériau morainique à coiffes.

Les différences granulométriques brutales associées à cette double séquence d'horizons témoignent d'une superposition de pédogénèses. Les variations spatiales de ce type de sol sont considérables : il n'est pas rare de constater une absence ou des dédoublements d'horizon A_{2g} ou B_{hg}. De même, le degré d'hydromorphie du bas du profil est variable. Seule la partie supérieure du profil est relativement constante. A l'échelle d'un versant, ces concentrations d'éléments fins en surface pourraient résulter d'un épandage périglaciaire à la périphérie des moraines. On en observe d'identiques aux étages subalpins et montagnards autour de moraines anciennes ou récentes. Mais, il peut s'agir aussi de différenciations plus locales comme il semble que ce soit le cas pour les sols podzoliques à horizon B_h profond.

Sous l'influence d'un enneigement considérable, en quantité comme en durée, des stagnogleys se sont différenciés dans ce matériau.

1.2.6 - Sols bruns soliflués

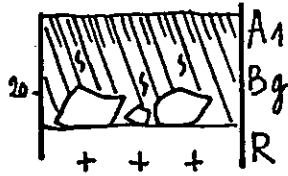
Ils occupent une surface notable dans les Aiguilles Rouges et faible sur le versant du Mont-Blanc. Ces sols, uniformément bruns et profonds, comportent de nombreux éléments grossiers. Ils se différencient à partir d'un matériau morainique ou ébouleux en pente forte. Les loupes et bourrelets de solifluxion sont de taille métrique à décamétrique. L'absence de lichens sur les blocs en surface et la végétation en lambeaux donnent à penser que ces mouvements sont actuels. Cette solifluxion se fait en masse et en profondeur ce qui la différencie de celle, très superficielle, qui affecte les stagnogleys décrits précédemment.

1.3 - LES SOLS DEVELOPPES SUR DES SUBSTRATS COMPACTS

Ces sols ne couvrent qu'une faible partie des vastes surfaces de roches moutonnées qui affleurent dans les Aiguilles Rouges et particulièrement sur leur versant orienté au Nord.

1.3.1 - Sols noirs à Polytrichum sexangulaire

On observe ces sols dans les Massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges dans des microcuvettes isolées sur les roches moutonnées et dans les éboulis très grossiers. Ils sont intensément colonisés par une mousse particulière, le Polytrichum sexangulaire, caractéristique des stations à très long enneigement.

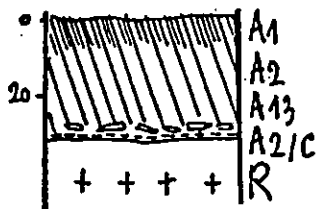


L'horizon A₁ noirâtre est constitué de parties mortes de Polytric juxtaposées à des grains minéraux lavés. La texture est argilo-limoneuse sans éléments grossiers, la matière organique représentant moins de 20 % de l'horizon. La structure est lamellaire, l'horizon B_g gris foncé de texture identique présente une structure en polyèdres dont les faces sont marquées par des marbrures rougeâtres. Au contact de la dalle rocheuse, on observe des éléments grossiers recouverts d'une fine pellicule rougeâtre.

Ces sols sont caractérisés par une granulométrie très fine, indépendante de la roche sous jacente et par leur isolement dans le paysage. En été, on observe sur les Polytric, de petits tortillons noirâtres alignés. Ces dépôts, concentrés en bordure de névé par la fonte estivale sont non négligeables (quelques grammes/m²/an). A l'analyse, ils indiquent une granulométrie et une minéralogie tout à fait semblables à celles du sol. L'origine partiellement éolienne des fractions minérales fines est donc vraisemblable, le matériau provenant du massif si ce n'est des environs immédiats. La matière organique de ces sols provient de la décomposition en place des mousses. La structure en polyèdres à faces nettes peut être attribuée au gel, dont nous avons pu constater qu'il affecte encore actuellement ces sols à l'automne et au printemps. On observe d'ailleurs, dans des positions semblables, de petites mares boueuses, toujours en eau, non colonisées par les mousses, et structurées en polyèdres identiques.

1.3.2 - Rankers alpins

Ces sols se développent sur les parties convexes des roches moutonnées et occupent une superficie restreinte.



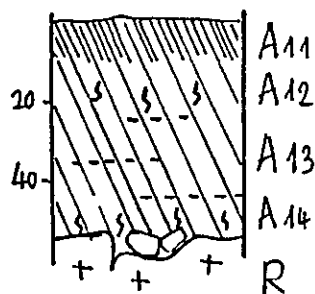
L'horizon A₁, brun foncé à noir, limono-argileux, sans éléments grossiers, présente une structure grumeleuse à sa partie supérieure, et massive à tendance fibreuse à sa partie inférieure. Au contact de la dalle apparaissent des graviers altérés. La dalle gneissique est désagrégée sur un centimètre d'épaisseur. L'analyse indique des teneurs en aluminium et en fer "libre" croissantes avec la profondeur.

Ces sols sont peu représentés dans le paysage car ils correspondent à un front de colonisation des roches moutonnées. Ils fonctionnent comme des horizons éluviaux vis-à-vis des rankers cryptopodzoliques ou des sols ocres podzoliques qui se développent en contrebas lorsque le matériau minéral fragmenté est plus épais.

1.3.3 - Rankers hydromorphes

Ils s'observent sur les pentes faibles et les parties concaves des roches moutonnées et occupent sous une végétation de "combe à neige" une superficie assez vaste sur le versant Nord des Aiguilles Rouges et en particulier dans la combe de Carlaveyron. Il s'agit d'une gamme de sols humifères, à structure lamellaire généralement fibreuse et marqués par l'hydromorphie (taches rouilles, gainages racinaires). En versant Nord, leur morphologie est assez variable, tant en ce qui concerne leur épaisseur, leur teneur en matières organique et minérale et l'expression de l'hydromorphie. En effet, le pédoclimat, homogène pendant la quasitotalité de l'année (dix à onze mois d'enneigement), imprime des caractères identiques à des sols qui diffèrent par leur position dans le paysage.

A l'inverse, sur le versant Sud, les rankers hydromorphes sont localisés dans des microcuvettes ou en position de drainage préférentiel à proximité d'une eau libre (ruisseau, lac).

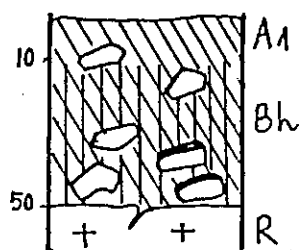


Le sol décrit se situe en face Nord dans un microthalweg en pente douce. L'horizon A brun noirâtre plus humifère en profondeur qu'en surface (10 à 20 %), limono-sablo-argileux, présente une structure lamellaire fine sans éléments grossiers avec des petits liserés horizontaux de sables altérés couleur rouille. Au contact de la dalle, le matériau plus clair et plus sableux comporte quelques éléments grossiers enduits de couleur rouille. Un mat de racines fines coiffe la dalle.

Les véritables tourbes sont très rares à l'étage alpin; en effet, d'une part, la productivité végétale est trop faible en raison des conditions climatiques et trophiques du milieu, d'autre part, les variations du niveau de l'eau lors de la fonte des neiges sont sans commune mesure avec la vitesse de croissance des espèces végétales et leur capacité de rétention en eau. Aussi, et contrairement à l'étage subalpin où les tourbières sont très fréquentes dans les surcreusements glaciaires humides, les dépressions alpines sont-elles généralement occupées par des lacs.

1.3.4 - Rankers cryptopodzoliques "noirs"

Ces sols s'observent dans de petits éboulis stabilisés grossièrement fragmentés reposant sur la dalle rocheuse en pente faible à moyenne, sous une pelouse dense.



L'horizon A₁, brun foncé, limono argileux, présente une structure micro-agrégée bien développée et prospectée par de très nombreuses racines.

L'horizon Bh noir montre une structure grumeleuse à sous-structure micro-agrégée et de très nombreux éléments grossiers revêtus de brun rougeâtre.

A l'analyse, l'horizon Bh présente des teneurs en fer et aluminium libres nettement plus élevées qu'en A₁.

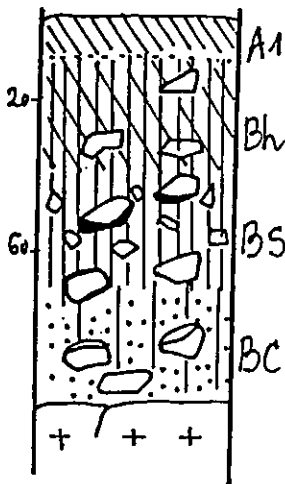
Ces sols ne se développent que dans des matériaux grossiers. Lorsque le degré de fragmentation est plus élevé, se différencient des sols ocres podzoliques à moder alpin ou des sols podzoliques à Bh profond.

1.3.5 - Sols ocres podzoliques et podzols "alpins"

On observe ces sols sous des couvertures végétales peu déchirées, en position généralement stable, sur les dépôts fragmentés, morainiques ou ébouleux, qui couvrent les roches moutonnées.

Les podzols alpins sont rares et s'observent dans des positions particulièrement stables. Les plus développés se trouvent en face Nord au plan de l'Aiguille sur des dépôts morainiques subhorizontaux de protogyne finement fragmentés.

L'influence d'une amélioration climatique pendant l'optimum atlantique a souvent été invoquée pour expliquer la différenciation de tels sols à cet étage (NEUWINGER, 1970).



Ce sol ocre podzolique présente un horizon A₁ brun sombre à structure grumeleuse ferme, un liseré de grains minéraux lavés blanchâtres (A₂). L'horizon Bh épais (20 cm)² noirâtre, comprend de très nombreux éléments grossiers emballés dans une matrice meuble, grumeleuse, pénétrée par de très nombreuses racines. Les cailloux sont revêtus de noir, surtout à leur face inférieure. L'horizon Bs gorgé d'eau, brun rougeâtre, induré, montre des dépôts brun rouge sur les éléments grossiers et présente une structure grossièrement parallèle à la pente. Il évolue en profondeur vers un matériau jaunâtre. Une natte de racines apparaît au contact de la dalle en pente forte.

Les revêtements noirs à la face inférieure des éléments grossiers du Bh semblent indiquer une dynamique latérale de l'eau au sommet du Bs.

Ces sols se distinguent des sols ocres podzoliques subalpins par le type d'humus et la structure de l'horizon A₁. L'horizon Bs est généralement meuble, sauf lorsqu'il se développe dans des placages morainiques.

1.4 - PRESENTATION DES RELATIONS GENERALES : SOLS-MILIEUX A L'ETAGE ALPIN

Pour présenter les relations générales : sols-milieus, nous utiliserons une typologie très proche de celle élaborée par CABIDOCHÉ (1979) dans la haute montagne pyrénéenne. Quatre grands facteurs la composent :

- La stabilité du milieu

Nous avons retenu trois degrés de stabilité du milieu basés sur des indicateurs biologiques ou géomorphologiques.

+ Milieu stable : ne subissant ni d'apport ni de départ important de matière sous l'influence de glissements, d'éboulements, ou d'avalanches. (Couverture végétale non déchirée, éléments grossiers encastrés dans la végétation et colonisés par les lichens, absence de bourrelets de solifluxion).

+ Milieu très instable : subissant des apports constants (éboulis), une érosion active (moraines récentes), ou périodiquement des remaniements profonds (solifluxion). (Végétation déchirée ou éparse, très nombreux blocs en surface non colonisés par des lichens, microrelief caractéristique...).

+ Milieu instable : Il se situe entre ces deux extrêmes.

- La présence (ou l'absence) d'un substrat compact

imperméable dans le volume de matériau intéressé par la pédogenèse.

- Le degré de fragmentation du matériau dans lequel se développe le sol. Quatre degrés de fragmentation ont été définis :

- + matériau non fragmenté : dalle rocheuse
- + matériau peu fragmenté : blocs et cailloux (ex.: éboulis grossier)
- + matériau fragmenté : cailloux à arène interstitielle (ex.: moraine)
- + matériau très fragmenté : terre fine très nettement dominante.

- La "fourniture hydrique", c'est-à-dire la quantité d'eau susceptible de percoler à travers le sol. Quatre intensités ont été définies :

- + climatique : correspondant à la pluviométrie locale
- + concentrée : lorsque se produit une concentration locale de l'eau sous l'influence d'un drainage latéral obligatoire au contact d'un substrat imperméable
- + combe à neige : elle caractérise les zones où se dépose par suite d'une variation locale du relief et du microclimat, une quantité de neige très supérieure à la normale. Une association végétale typique, dite de combe à neige, caractérise de tels endroits
- + cumulative : lorsque la concentration de l'eau s'effectue à l'échelle du bassin versant.

Le tableau 5 présentant les relations générales : sols-milieus à l'étage alpin est basé sur cette typologie : quatre grands facteurs du milieu, stabilité, fragmentation

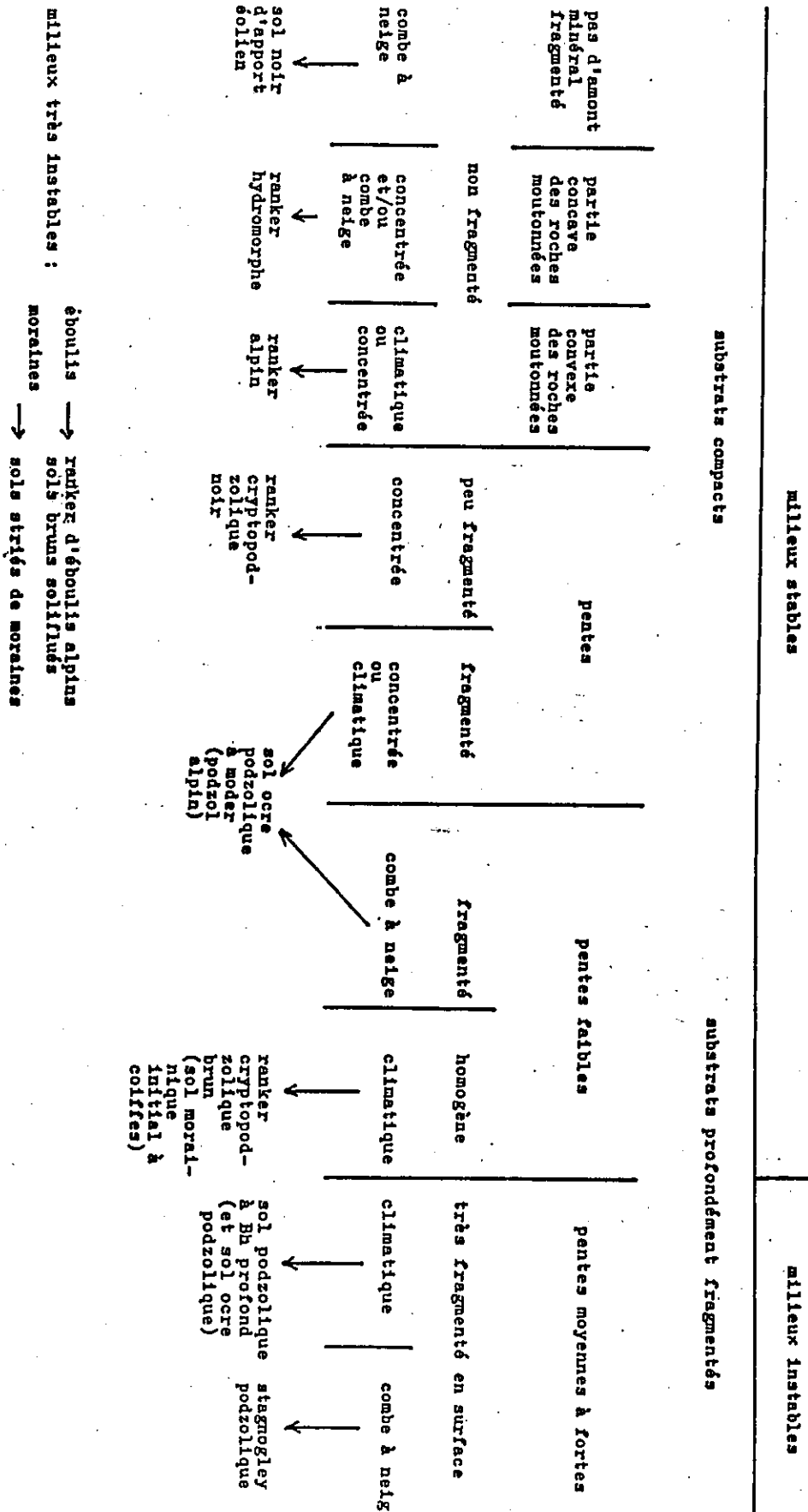


Tableau 5 : RELATIONS SOLS - MILIEUX A L'ETAGE ALPIN

du matériau et du substrat et fourniture hydrique, permettent de rendre compte de la diversité des sols observés et décrits à cet étage. La position des sols dans le paysage a été indiquée dans le tableau pour le rendre plus lisible.

Remarque : Nous considérons la végétation de "combe à neige", caractéristique des zones à enneigement cumulé, comme un indicateur d'une fourniture hydrique concentrée, mais d'un type particulier. En effet, il nous est difficile de distinguer, dans l'effet "combe à neige" la part qui revient à la quantité de neige (fourniture hydrique concentrée) et celle qui revient à la durée d'enneigement (pédoclimat particulier).

1.5 - CONCLUSION A L'ETUDE DES SOLS DE L'ETAGE ALPIN

On observe à l'étage alpin une vaste gamme de sols qui correspond à l'extrême diversité des conditions de milieu.

- Les vastes superficies de roches polies ne sont que très partiellement couvertes par des sols. Peu épais, reposant généralement sur la dalle non fragmentée et peu altérée, ils représentent alors un stade de conquête sur la roche, plus ou moins récent. Si les mécanismes essentiels qui permettent leur extension par apport de matière, sont le colluvionnement et les avalanches, il semble que les apports éoliens, stabilisés par la végétation puissent jouer un certain rôle dans la constitution de la fraction minérale fine de certains de ces sols.

- Les sols développés sur des formations superficielles profondément fragmentées montrent, avant même d'être colonisés et stabilisés par la végétation, des organisations à coiffes sur les éléments grossiers et à vides d'entassement, qui témoignent d'un soutirage intense. Parallèlement apparaissent, selon des mécanismes de tri sélectifs le long des pentes, des concentrations de

particules fines ou grossières en surface. Ces mécanismes sont actifs tant que la surface du sol n'est pas stabilisée par une couverture végétale dense.

- La quasitotalité des sols présente des caractères podzoliques plus ou moins masqués. Dans une situation topographique et microclimatique donnée, la morphologie et le degré d'évolution des sols sont déterminés, à travers la dynamique hydrique, par le degré de fragmentation du matériau et du substrat et par la stabilité du milieu édaphique :

. Moins les matériaux sont fragmentés, plus les sols apparaissent foncés et humifères :

- les horizons Bh (morphologiques) sont particulièrement développés dans des matériaux grossièrement fragmentés.

- à l'inverse, les horizons Bs (ocreux) n'apparaissent que lorsque le matériau a atteint un certain degré de fragmentation.

- les horizons A₂ blanchis (stagnogleys podzoliques, podzols alpins) apparaissent dans des matériaux très fragmentés.

. Les horizons Bh et Bs semblent se développer d'autant mieux, lorsque les conditions de fragmentation du matériau leur sont favorables, que les fournitures hydriques sont plus concentrées. Le rôle spécifique ici attribué à une fourniture hydrique concentrée pourrait cependant être discuté dans la mesure où il ne repose que sur des observations morphologiques.

. Les podzols alpins se trouvent dans des positions particulièrement stables.

. Inversement, Les sols très instables sont peu podzolisés.

Les différences observées quant aux proportions des différents types de sols sur les deux versants de la vallée tiennent essentiellement à l'inégale répartition des roches-mères. Cependant, un paramètre climatique représenté par les combes à neige, beaucoup plus abondantes en face Nord, intervient secondairement pour différencier, dans des matériaux très fragmentés, des sols particuliers : les stagnogleys.

L'étage alpin se distingue par sa diversité et par le développement privilégié de sols généralement appelés rankers, mais recouvrant une réalité complexe, variée et mal connue. L'étude des relations sols-milieus nous a permis de préciser pour chaque type de sols quels étaient les facteurs déterminants de sa formation. L'étude du fonctionnement actuel d'un ranker particulier (cf. Chapitre III), nous permettra de préciser certains aspects de la dynamique biogéochimique de ces sols.

2. LES SOLS DE L'ETAGE SUBALPIN

Caractères généraux et logiques de répartition.

Le plan suivi est le même que pour l'étage alpin c'est -à-dire, situation des différents types de sols le long des versants, description succincte de leurs caractères, analyse de leurs conditions d'apparition et présentation générale des relations sols-milieus à cet étage.

2.1 - REPARTITION DES SOLS DANS LE PAYSAGE

Les figures 6 et 7 situent les principaux types de sols en fonction du modelé et des formations superficielles dominantes, sur les deux versants de la vallée. L'échelle des hauteurs a été légèrement exagérée pour les besoins du schéma. Contrairement à ce que nous avons vu à propos de l'étage alpin, l'étagement des formations superficielles est ici grossièrement le même sur les deux versants. Par contre, les sols distinguent les deux massifs : la tranche altitudinale occupée par les podzols est nettement plus importante côté Mont-Blanc que côté Aiguilles Rouges.

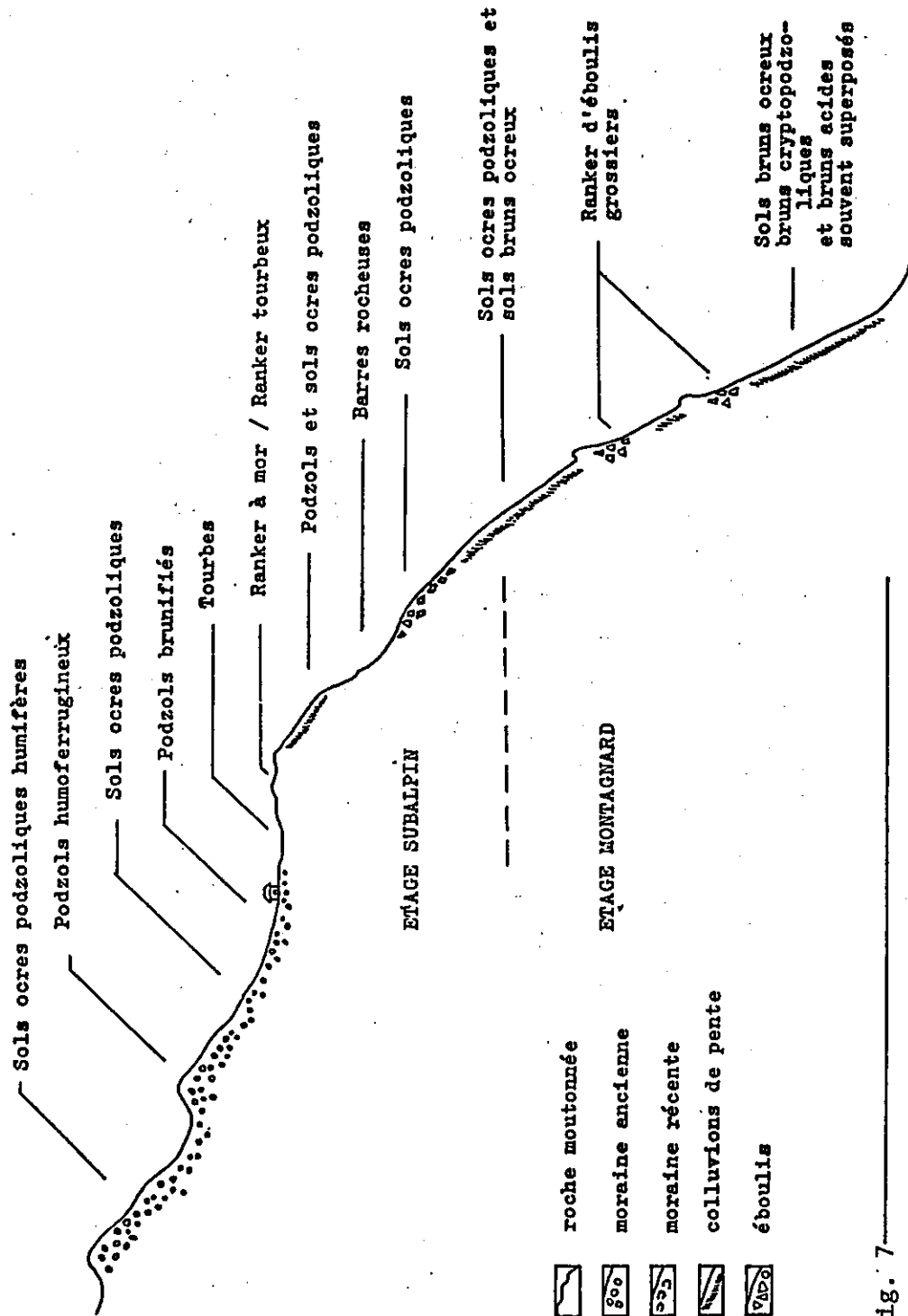


Fig. 7

REPARTITION DES SOLS A L'ETAGE MONTAGNARD ET SUBALPIN
Versant AIGUILLES ROUGES (exposition SE)

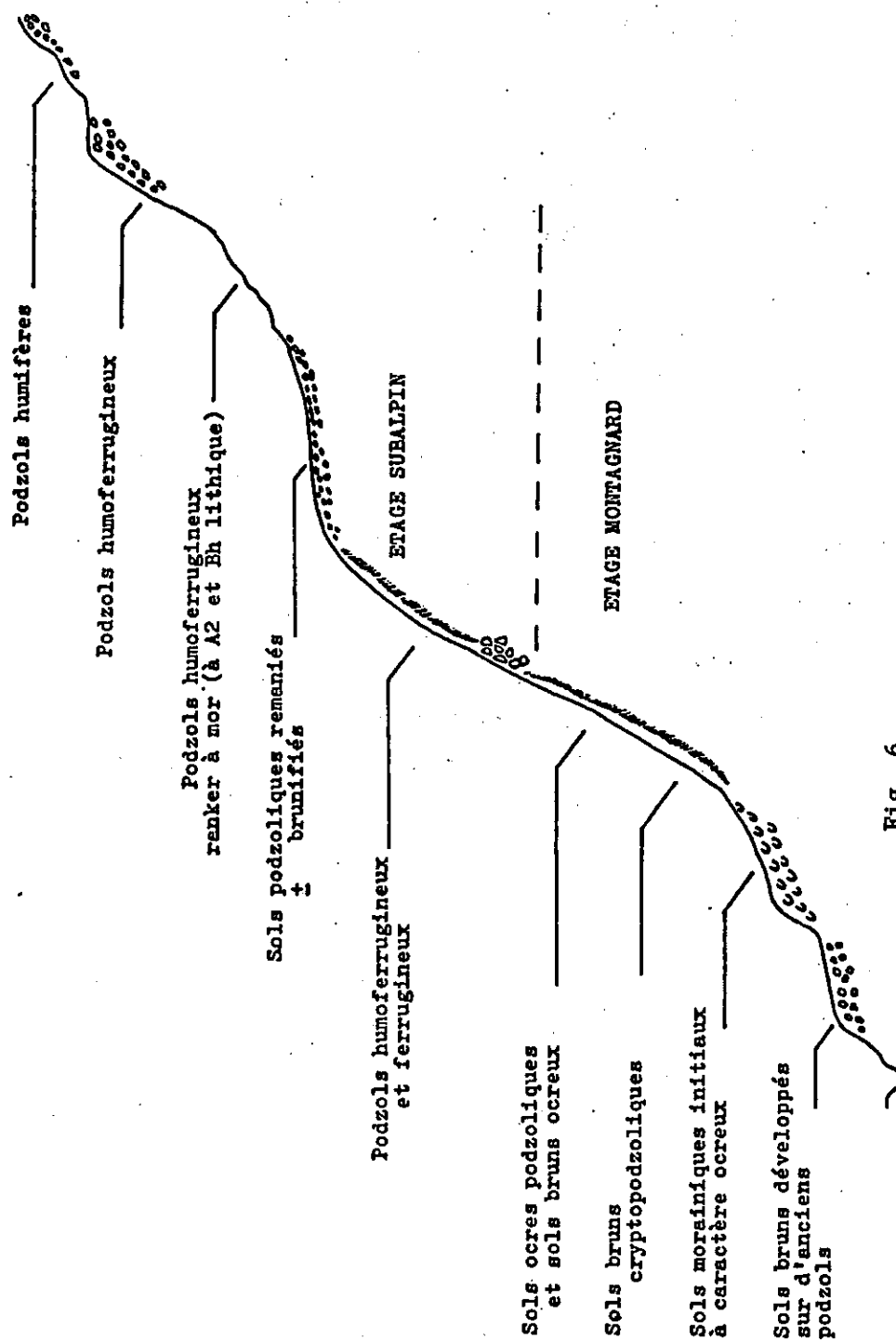


Fig. 6

REPARTITION DES SOLS A L'ETAGE MONTAGNARD ET SUBALPIN
Versant MONT BLANC (exposition NW)

2.2 - LES SOLS DEVELOPPES SUR DES SUBSTRATS NON FRAGMENTES

Ils occupent une surface très marginale, contrairement à ce que nous avons vu à l'étage alpin.

2.2.1 - Rankers à mor

Ces sols apparaissent à l'étage subalpin sur les substrats non fragmentés : dalle cristalline rabotée par les glaciers ou éboulis à blocs très grossiers. Sur les éboulis très grossiers, se forment des xéromors bruns rougeâtre, à couche F dominante ; sur les parties convexes des roches moutonnées apparaissent des mors noirâtres à couche H plus développée structurée en micro-agrégats coalescents. Au contact de la dalle, on observe généralement un matériau grisâtre foncé organo-minéral à structure massive à fibreuse. Lorsque le matériau est légèrement fragmenté apparaît un horizon A₂ parfois souligné par un micro-horizon Bh lithique.

2.2.2 - Rankers tourbeux

Ils apparaissent dans les parties concaves, non fragmentées, des roches moutonnées et se caractérisent par une structure fibreuse en profondeur. Ils se distinguent de leurs homologues de l'étage alpin par un humus de surface de type hydromor.

2.2.3 - Tourbes

Elles sont relativement abondantes à l'étage subalpin

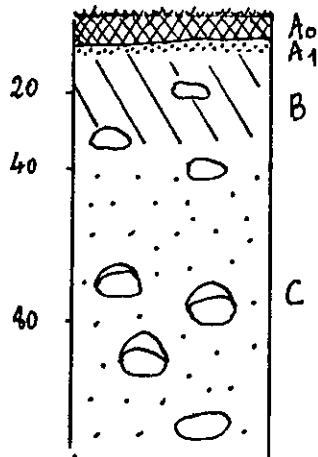
et apparaissent dans des zones de surcreusement glaciaire. La tourbe, essentiellement formée par des résidus de sphaignes, est généralement blonde lorsqu'elle ne subit pas d'apport minéral par les avalanches. Elle peut alors être épaisse (> 6 m au plan de la Cry). Cependant, la morphologie des versants ne permet guère l'installation de vastes tourbières, comme dans le Massif-Central, le Jura ou les Vosges.

Bien que rares, certains sols développés dans des matériaux fragmentés de faible épaisseur et reposant sur une dalle rocheuse peuvent s'observer à l'étage subalpin. Cependant, d'une part nous n'en avons jamais observé de surfaces continues d'extension notable et d'autre part, leurs caractères nous sont apparus très proches de ceux développés sur des substrats profondément fragmentés. Aussi les avons-nous associés.

2.3 - LES SOLS DEVELOPPES SUR DES SUBSTRATS PROFONDEMENT FRAGMENTES

2.3.1 - Les sols morainiques initiaux à caractère ocreux

Développés sur les moraines latérales récentes des grands glaciers du Massif du Mont-Blanc, ils occupent une surface notable en fond de vallée et faible à l'étage subalpin. Les moraines du fond de vallée ont été rapidement et densément colonisées par le mélèze (les premiers mélèzes se sont installés entre 20 et 30 ans après le retrait du glacier (ANDRE, 1971), puis par l'épicéa. Au subalpin, la colonisation est beaucoup plus lente du fait de la position généralement instable des moraines à cet étage.



Situé sous un mélezin à rhododendron, ce profil montre une accumulation notable de matière organique en surface: un moder brun rougeâtre de 5 cm d'épaisseur surmonte un horizon gris clair (A_1/A_2) sablo-graveleux, peu épais, relativement pauvre en éléments grossiers. L'horizon B de couleur générale brun jaune présente de nombreuses poches grisâtres sans relations avec les racines, et une structure polyédrique subanguleuse à micro-agrégée englobant de nombreux graviers. L'horizon BC sous jacent présente des coiffes hétérogènes sur les éléments grossiers. En profondeur, les éléments grossiers sont englobés dans une matrice hétérogène, compacte et fragile, présentant par endroits des ségrégations de matériau fin, lité, en lentilles discontinues, de pente variable, contemporaines du dépôt. L'enracinement dense en surface est diffus jusqu'à 40 cm.

Ces sols se distinguent de leurs équivalents à l'étage alpin par l'apparition d'une accumulation de matière organique en surface et par la différenciation morphologique d'une ébauche de caractère podzolique. Nous n'avons pas cherché à vérifier cette différenciation par l'analyse chimique. En effet, PATERNOSTER (1981) qui avait étudié des sols très semblables sur les moraines latérales du même âge, du grand glacier d'Aletsch a pu montrer que l'évolution morphologique n'était accompagnée que d'une très faible différenciation chimique.

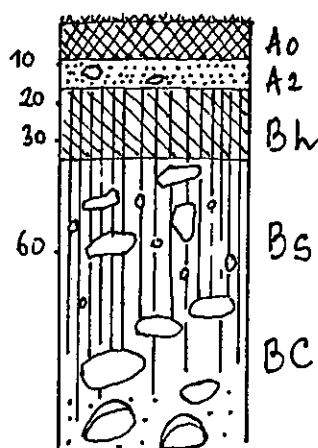
2.3.2 - Les podzols humoferrugineux

Ils occupent en face Nord une large bande altitudinale entre 1700 et 2200 m, mais ne représentent en réalité qu'un pourcentage assez faible de la surface. Ils s'intègrent en effet dans un ensemble complexe de sols intergrades marqués par un pédogenèse podzolique mais ne présentant pas d'horizon A_2 blanchi continu. Ces sols montrent fréquemment des figures caractéristiques de phénomènes de troncature ou

de colluvionnement. Ainsi, il n'est pas rare d'observer plusieurs générations de podzols superposés développés dans des matériaux d'apports successifs. Les podzols occupent préférentiellement les positions stables, mais s'observent aussi sur de faibles pentes.

En face Sud, si l'on peut rencontrer des podzols dans la même tranche altitudinale, ils n'occupent une superficie notable qu'aux alentours de 1800 à 1900 m. Ils sont alors localisés dans des positions particulièrement stables : sommets de moraine, extrémité aval des combes subalpines colonisées par les mélèzes.

Une étude plus détaillée de la répartition et de la morphologie des podzols sur moraine est présentée au chapitre III-5.



Le profil présenté est situé sur les pentes d'une moraine en face Nord colonisée par une lande dense à rhododendron. Un humus de type mor épais à couche H noirâtre, massive, bien développée ($C/N = 27$) surmonte un horizon A_2 très appauvri en fer total, blanc grisâtre, sableux, meuble. L'horizon Bh noir à brun rougeâtre foncé en descendant présente une structure lamellaire fine parallèle à la pente assez ferme et évolue lentement vers un horizon Bs ocre, plus riche en éléments grossiers à surstructure polyédrique ferme et sous structure lamellaire. Le maximum de fer libre se trouve en Bh, d'aluminium libre en Bs.

L'horizon BC présente des coiffes hétérogènes à la face supérieure des éléments grossiers, en tous points identiques à celles observées sous les sols morainiques initiaux à caractère ocreux.

Suivant leur position dans le paysage, les podzols peuvent présenter des morphologies assez variables particulièrement en ce qui concerne :

. **L'humus** : généralement c'est un mor épais à couche H massive à fibreuse reposant directement sur l'horizon A_2 . Cependant on observe en face Sud des mor à couche F dominante sous couvert forestier (épicéa) ou des mors à couche H constituée de microboulettes surmontant un horizon A_1 organominéral bien développé, particulièrement sous les landes à genévrier.

. **La structure des horizons Bs** : dans des matériaux finement fragmentés et homogènes, la structure est micro-agrégée et meuble, elle est polyédrique à massive dans des matériaux plus grossiers, et souvent indurée sur les moraines.

. **La couleur des horizons A_2** : plus la charge en éléments grossiers de l'horizon A_2 est forte, plus il apparaît foncé et humifère.

2.3.3 - Podzols et sols ocres podzoliques humifères

Ils sont caractérisés par une couleur plus foncée de l'ensemble du profil ou plus particulièrement des horizons A_1/A_2 et se distinguent entre eux par la présence d'un liseré blanchâtre (A_2) net pour le podzol. Leurs conditions d'apparition sont assez variées :

- Dans les positions où l'on observe généralement des podzols humoferrugineux, mais sur des matériaux peu fragmentés.

- Sous une végétation de "crête ventée" qui caractérise les zones déneigées par le vent en hiver. L'ensemble du profil est très humifère, l'horizon A_2 apparaît généralement en liseré, le sol est structuré en lamelles très denses par le gel.

- A la transition avec l'étage alpin, la végétation herbacée, beaucoup plus abondante, s'enracine profondément dans les profils. L'ensemble du sol est alors humifère.

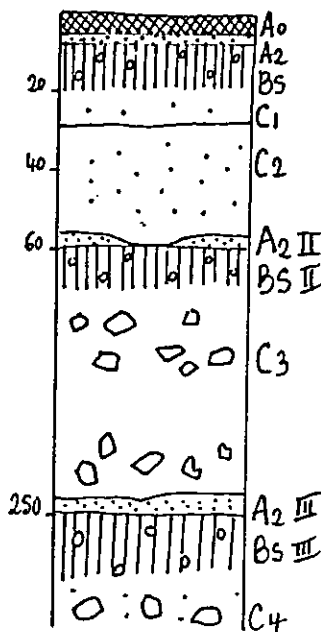
- Sous l'influence de remaniements du haut des profils. Les podzols présentent alors des horizons A_0 , A_1 épais, les horizons A_2 ne subsistent que sous forme de liserés discontinus ou dédoublés.

L'intervention conjointe de plusieurs de ces facteurs complique souvent l'interprétation de ces profils.

2.3.4 - Sols podzoliques remaniés et brunifiés

Ils occupent le fond des cirques glaciaires ; sur ces replats se sont déposés les produits issus de l'érosion des moraines frontales sous l'influence des torrents sous glaciaires, puis le matériel amené par les avalanches périodiques. Enfin, ces sols ont subi des transformations sous l'influence d'un pâturage plus ou moins intensif lequel a disparu récemment. Aussi, la morphologie de ces profils est-elle assez complexe.

- Sols podzoliques remaniés

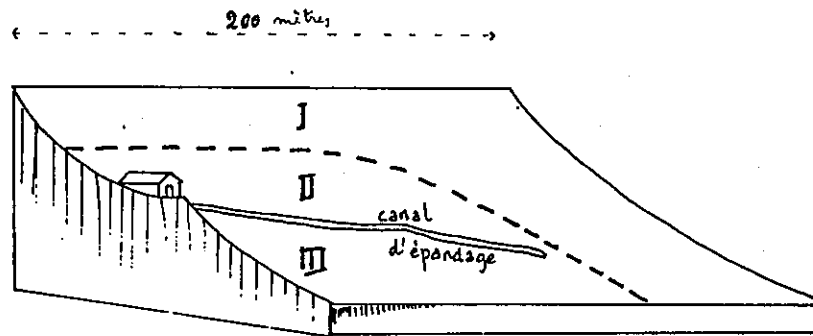


Situé à plat sous un mélezin âgé (> 200 ans) à rhododendron, ce profil montre un sol polycyclique remanié. Il est constitué de trois séquences d'horizons podzoliques intercalées par des couches de granulométrie variable, mais généralement homogène. Sableuse à limonosableuse ou très grossière, ces couches sont en fait des lentilles : elles n'ont ni la même forme ni la même texture sur les quatre faces d'une même fosse.

Ces sols montrent qu'en l'espace d'environ 8.000 ans, deux à trois générations de podzols ont pu se développer. L'épaisseur des dépôts successifs permet de penser que des avancées glaciaires pourraient aussi être responsables des remaniements. Sur le versant Aiguilles Rouges, on observe des superpositions identiques, mais le dernier sol formé est un sol ocre podzologique.

- Podzols brunifiés :

Pour appréhender les transformations du sol sous l'influence du pâturage, nous avons étudié les sols de trois stations de plus en plus éloignées d'une étable et du canal d'épandage qui fertilisait l'alpage. Le pâturage est actuellement abandonné.

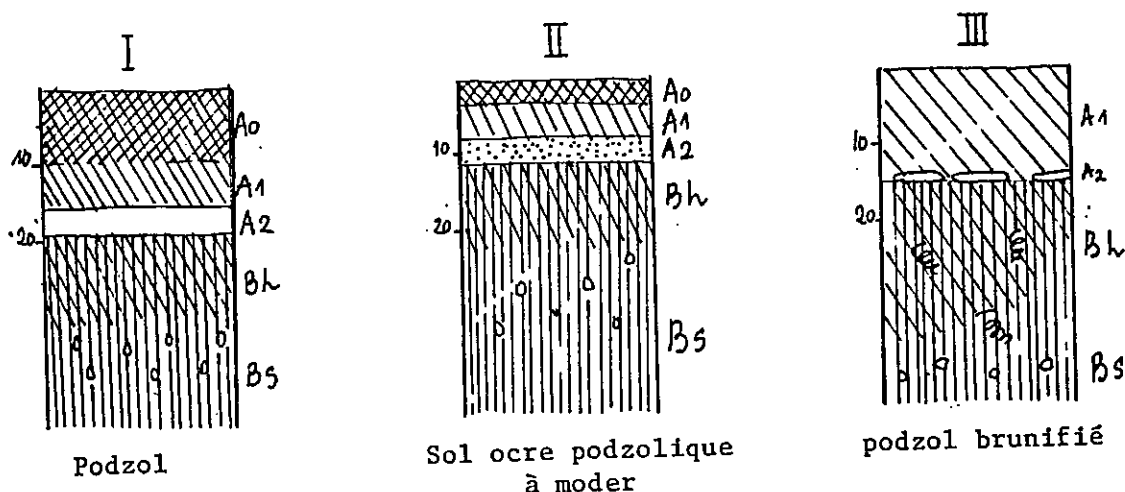


La station I la plus éloignée du chalet présente, sous une lande dense à rhododendron, des podzols et sols ocres podzoliques humifères à mor.

La station II en pente faible au-dessus du canal d'épandage est une pelouse acidophile à Nard partiellement envahie par les éricacées. Elle présente des podzols et sols ocres podzoliques à moder.

La station III située à proximité du chalet sous le canal d'irrigation porte une prairie mésonitrophile enracinée dans un podzol brunifié en surface.

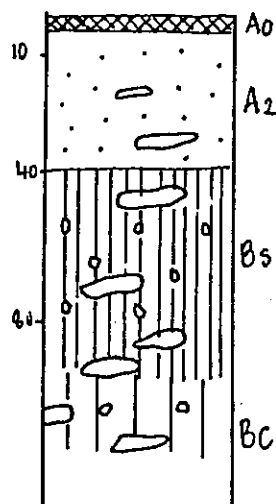
Les sols associés à ces stations sont les suivants :



Ainsi sur des pentes faibles, et à partir d'un matériau fragmenté, le pâturage le plus intensif ne modifie profondément que les horizons supérieurs du sol : on observe un horizon A_1 de sol brun, un fantôme d'ancien horizon A_2 et un horizon B_s globalement non modifié mais présentant des poches et pénétrations de terre brune en relation avec des galeries biologiques. L'abondance des sols ocres podzoliques dans les combes subalpines des Aiguilles Rouges ne peut donc être que très partiellement expliquée par le pâturage.

2.3.5 - Podzols ferrugineux

Ils occupent une faible superficie sur le versant du Massif du Mont-Blanc. On les observe le plus souvent sur des pentes fortes sous une formation végétale particulière : la megaphorbiaie, généralement considérée comme caractéristique des zones abritées, bien alimentées en eau et souvent remaniées par des avalanches.



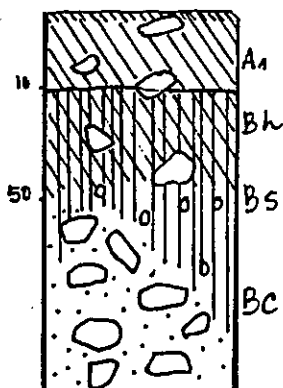
Ce profil est situé sous un mélèze à aulne vert et laitue des Alpes en pente forte sur un colluvion de pente.

Sous un tapis d'aiguilles et de mousses peu épais ($C/N = 13$) on observe un horizon A_2 épais, hétérogène, gris clair avec des bandes plus jaunes et de très nombreuses dalles de schiste cristallin parallèles à la pente. La texture est limonosableuse et la structure en lamelles fines. L'horizon B_s sous jacent, brun ocre, plus argileux, présente une structure polyédrique avec des revêtements bruns sur les faces des agrégats, et de très nombreux éléments grossiers. Il est riche en fer et aluminium libres, mais pauvre en matière organique (2,5 %). L'horizon BC brun jaune, plus sableux mais hétérogène présente quelques revêtements sur les faces d'agrégats et quelques gainages racinaires.

Ces profils ne sont jamais continus sur plusieurs mètres, les horizons se dédoublent, s'épaississent, ou se divisent en lentilles et en poches qui recoupent généralement les variations granulométriques. Le matériau, de texture généralement fine, sablo-limoneuse à limono-sableuse, occupe un volume nettement supérieur à celui des éléments grossiers surtout en haut du profil ; si l'on peut soupçonner un fonctionnement hydromorphe, les gainages racinaires qui pourraient en témoigner sont rares.

2.3.6 - Sols ocres-podzoliques

Ces sols occupent une vaste surface particulièrement dans les Aiguilles Rouges. A l'étage subalpin, ils se développent sur des pentes fortes et instables des moraines et des cônes d'éboulis et d'avalanche. Ils sont d'autant plus abondants que l'exposition est plus chaude. A l'étage montagnard supérieur, on les observe dans la plupart des positions (mis à part les couloirs d'avalanches ou d'éboulis) sans qu'ils occupent cependant toute la superficie.



Le profil décrit se situe sous une lande à genévrier peu dense, déchirée par endroit, sur une moraine en pente forte à microrelief en gradins. Sous un mat racinaire de graminées, l'horizon A₁ brun présente une structure polyédrique subanguleuse fine à grumeleuse, les grains minéraux étant généralement sales. L'horizon Bh brun vif présente une structure micro-agrégée très nette, de même que l'horizon Bs, ocre vif, sous-jacent. Les maximums de fer et d'aluminium libres s'observent en Bs. Cet ensemble d'horizons est très meuble et densément exploré par les racines. Il comporte de nombreux éléments grossiers en tous sens. Son épaisseur est très variable, l'horizon Bs disparaissant par endroits. La transition Bs/BC est brutale. L'horizon BC gris jaunâtre, légèrement induré, très riche en éléments grossiers présente quelques fins revêtements bruns autour des éléments grossiers.

Le microrelief en gradins, l'épaisseur très variable des horizons Bs, ainsi que la brutalité de la transition Bs/BC permettent de penser que ce sol n'est pas en place. Ceci nous a été confirmé par la présence sur certaines de ces fortes pentes morainiques de stries de quelques mètres de largeur, parallèles à la pente et sans couverture végétale. A l'aval de ces stries, on observe des restes de paravalanches : imprudemment implantés sur ces pentes peu stables, ils ont glissé sur plusieurs dizaines de mètres à l'aval de leur point d'ancrage initial.

2.3.7 - Sols de milieux très instables

Les sols placés dans des positions très instables (couloir d'avalanche, éboulis actif, solifluxion) ont déjà été décrits à l'alpin. Ils sont proportionnellement moins abondants au subalpin du fait du modelé plus doux des cirques glaciaires.

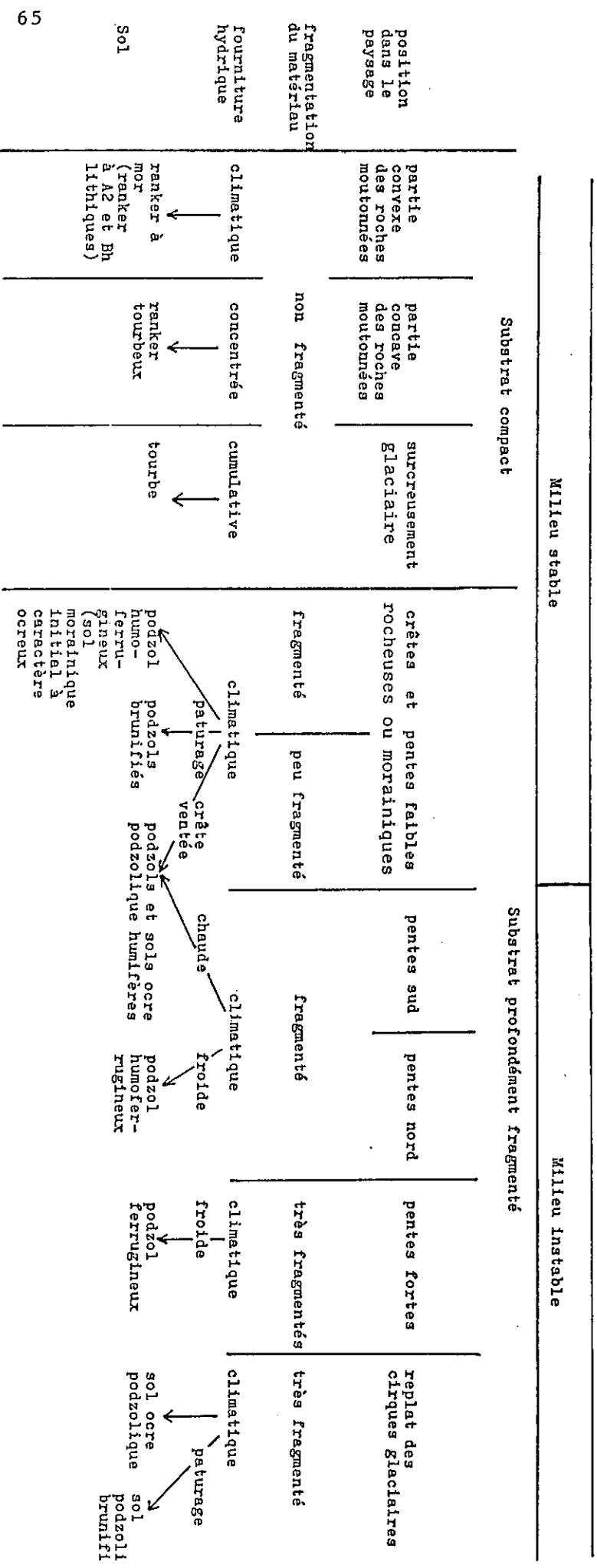
2.4 - PRESENTATION DES RELATIONS GENERALES SOLS -MILIEUX A L'ETAGE SUBALPIN

Ces relations sont décrites (Tableau 6) de la même façon que pour l'étage alpin (cf. Chapitre I-4). Nous avons de plus pris en compte l'exposition, critère très global mais qui nous semble cependant pertinent à cet étage. En effet :

- Les podzols ferrugineux qui n'existent qu'en versant Nord, apparaissent dans un matériau très fragmenté sur des pentes fortes abritées et souvent instables à enneigement tardif. La "fraicheur du milieu" y sélectionne une association végétale particulière, la mégaphorbiaie, constituée d'espèces végétales annuelles à grandes feuilles, riches en azote et dont la biodégradation est rapide.
- Les pentes morainiques fortes et instables, exposées au Sud, portent des sols ocres podzoliques souvent humifères. Dans les mêmes positions, on observe en orientation Nord des podzols plus ou moins humifères qui subissent un enneigement de plus longue durée, des températures plus fraîches et portent des landes à rhododendron, dont l'enracinement est superficiel et la litière difficilement biodégradable.

C'est cet ensemble de conditions, souvent prises en compte par la diversité des associations végétales et parmi lesquelles la durée d'enneigement nous semble jouer un rôle non négligeable, que nous caractérisons très globalement par l'exposition.

Par ailleurs, les critères pris en compte pour définir



Milieux très instables → sols bruns remaniés et ranker d'éboulis

Tableau 6 : RELATIONS SOLS - MILIEUX A L'ETAGE SUBALPIN

la stabilité relative du milieu sont les mêmes qu'à l'étage alpin en ce qui concerne les milieux très stables et très instables. Les milieux intermédiaires sont par contre, rapidement colonisés par une végétation qui masque souvent l'instabilité en particulier sous forêt. Nous nous sommes alors guidés grâce à la présence de certains groupements végétaux (Aulnaie verte) et surtout sur la continuité (à l'échelle métrique) des horizons du sol.

Deux grands ensembles de sols peuvent être aisément distingués à partir de ce tableau :

- Les sols essentiellement organiques (ranker à mor, ranker tourbeux, tourbe).
- Les sols podzoliques (podzol, sol ocre podzologique et variante).

Si l'on se réfère à la diversité de l'étage alpin, on constate au subalpin une "tendance" générale des sols vers la podzolisation.

2.5 - CONCLUSION A L'ETUDE DES SOLS DE L'ETAGE SUBALPIN

La podzolisation est maximale à cet étage ; mis à part les sols holorganiques, elle s'exprime nettement sur tous les matériaux. Elle est cependant modulée par les différents facteurs du milieu :

La fragmentation du matériau

- De même qu'à l'étage alpin, les sols présentent des organisations qui témoignent de transferts de particules dans les profils (coiffes) et le long des pentes (concentrations de particules fines en surface).

- Les sols développés dans des matériaux peu fragmentés sont humifères (CABIDOCHÉ, 1979). La teneur et la

répartition de la matière organique semble généralement liées sur le terrain à la densité et à la profondeur de l'enracinement.

- Les podzols développés dans des matériaux fragmentés (moraines) présentent des horizons Bs indurés. Ceux-ci sont meubles sur des matériaux très fragmentés (colluvions, épandages périglaciaires).

La fourniture hydrique

Son rôle n'est pas explicite, et ceci pour trois raisons :

- Les substrats compacts qui sont à l'origine de fournitures hydriques concentrées sont rares à cet étage.

- Les fournitures hydriques concentrées interviennent souvent dans des milieux stables. C'est le cas, par exemple, des extrémités aval stabilisées de cônes d'éboulis reposant, en profondeur, sur des roches moutonnées. La partie aval bosselée et stabilisée de ces cônes présente côte à côte de petites tourbières dans les creux, voisinant avec des podzols humoferrugineux sur les bosses. La pente de l'éboulis, périodiquement alimentée en colluvions provenant de l'amont, porte des sols ocres podzoliques plus ou moins humifères. L'absence d'étude piézométrique précise ne nous a pas permis de déterminer avec certitude dans ce type de cas, ce qui de la stabilité du milieu ou d'une éventuelle dynamique latérale des solutions (LEGROS et CABIDOCHÉ, 1977) est responsable de la présence des podzols. La stabilité du milieu nous semble cependant le facteur prépondérant, dans la mesure où elle permet une conservation de la pédogenèse.

- Des fournitures hydriques latérales et concentrées peuvent apparaître dans des matériaux profondément fragmentés par suite d'une différenciation pédologique d'horizons jouant le rôle de substrat imperméable (horizons

Bs indurés). L'hétérogénéité granulométrique du matériau ainsi que la fréquence des remaniements ne nous ont pas permis de mettre en évidence d'influence notable de tels transferts latéraux sur la morphologie des profils. Une étude succincte de cet aspect est présentée au chapitre III-5.

La stabilité du milieu

- La podzolisation s'exprime le plus nettement dans des milieux stables, en particulier sur les crêtes morainiques.

- Les remaniements par apport de matière tendent à modifier les horizons supérieurs des profils. On observe alors des podzols et sols ocres podzoliques humifères ou, sous l'influence d'un apport considérable de lisier, des podzols brunifiés en surface. Des remaniements plus importants (glissements, solifluxion) provoquent des modifications plus profondes (sols ocres podzoliques, sols bruns soliflués) qui sont particulièrement nettes sur le versant des Aiguilles Rouges.

L'orientation

- Elle semble jouer un rôle non négligeable, en particulier dans la dynamique de la matière organique. Cette influence se fait sentir lorsque le milieu est instable (podzols en versant Nord, sol ocre podzolique en versant Sud) ou lorsque le matériau est très fragmenté (podzols ferrugineux en versant Nord, sol ocre podzolique en versant Sud). Par ailleurs, les microclimats les plus rudes (crête ventée) se traduisent par un caractère humifère des sols.

Cette approche montre "l'envahissement" des sols subalpins par la podzolisation. L'étude du mécanisme de la podzolisation sera abordée, à travers l'analyse du fonctionnement biogéochimique de podzols sur moraine au chapitre III-5).

3. LES SOLS DE L'ETAGE MONTAGNARD

3.1 - PRESENTATION

La variété des microclimats et des formations superficielles observée aux étages subalpin et alpin se réduit fortement à l'étage montagnard. La Pessière dense, zèbrée de couloirs à aulne vert, d'éboulis secs et de chablis à mélèze, couvre des colluvions de pente périodiquement remaniées par les avalanches. Seules se distinguent les moraines anciennes et récentes du fond de vallée.

La répartition des sols dans le paysage suit très globalement le gradient altitudinal (voir figure 7) : sols ocres podzoliques et sols bruns ocres au montagnard supérieur, sols bruns ocres au montagnard inférieur. Cependant, l'instabilité générale des versants se traduit dans le détail par une juxtaposition dans l'espace de sols peu différenciés, présentant fréquemment des superpositions d'horizons bruns et ocres, résultant de troncatures et colluvionnements successifs. En particulier, des horizons ocres s'observent couramment en profondeur (1 m) à basse altitude. L'exposition intervient peu dans la répartition des sols. Seuls les éboulis grossiers distinguent les deux versants de la vallée : alors qu'ils apparaissent nus en adret, ils sont généralement couverts d'un moder peu épais de mousses et d'aiguilles en ubac.

Les moraines récentes du fond de vallée portent des sols morainiques initiaux du même type que ceux déjà décrit à l'étage subalpin.

Les sols développés sur les moraines anciennes présentent, par contre, un intérêt considérable : si leurs pentes abruptes sont occupées par des sols bruns profonds,

leurs crêtes ont conservé, par endroits, des podzols, au-dessus desquels on observe, dans un matériau d'apport peu épais, des sols bruns. Dans deux de ces moraines (Jeureuma et Lavancher), nous avons prélevé des fragments de charbon de bois incorporés dans l'horizon A₂ des podzols. Les datations au ¹⁴C effectuées à l'Institut de Limnologie (Thonon les Bains), nous ont indiqué des âges de -1100 B.P. (moraine du Lavancher) et -800 B.P. (placage morainique de la Jeureuma), ce qui pourrait correspondre à l'époque de la mise en culture de ces terres. Par ailleurs, ces moraines sont généralement considérées comme tardiglaciaires, c'est-à-dire déposées il y a environ 8000 ans. (La datation d'un échantillon de bois trouvé dans un niveau tourbeux enfoui au pied de la moraine du Lavancher nous a indiqué un âge minimum de 3000 ans). Plusieurs enseignements peuvent être tirées de ces observations :

- Les sols de la vallée de Chamonix ont subi des pédogenèses correspondant à des climats différents de l'actuel et qui ont conduit à la différenciation de podzols à basse altitude.
- Ces pédogenèses se sont conservées intégralement sur des crêtes de moraines, qui constituent des positions particulièrement stables, et ceci, quelles que soient les fluctuations climatiques ultérieures.
- Par conséquent, il semble qu'on ne puisse assimiler, même dans le cas de ces sols très jeunes, les sols placés dans les positions les plus stables à des sols en équilibre avec leur milieu (climax).

Les sols des massifs de haute montagne jeunes ne doivent donc pas être considérés comme résultant directement des conditions climatiques actuelles, mais comme le fruit d'une évolution climatique complexe, et ceci d'autant plus que le milieu est stable. En particulier, les horizons ocreux profonds mis en évidence à basse altitude, sur les fortes pentes de l'étage montagnard pourraient s'être

différenciées pendant une période identique à celle qui a permis la formation de ces podzols. Cette préparation climatique pourrait remonter au tardiglaciaire (VAUDOUR, 1982), lors de la lente remontée des grands glaciers du Mont-Blanc vers leur position actuelle.

3.2 - CONCLUSION A L'ETUDE DES SOLS DE L'ETAGE MONTAGNARD

Les sols de l'étage montagnard montrent très globalement une différenciation croissante avec l'altitude, souvent contrariée dans le détail par l'importance des remaniements. La présence à basse altitude d'horizons ocreux profonds peut être interprétée comme des reliques d'anciennes pédogenèses.

Le fonctionnement biogéochimique d'un sol brun ocreux développé sur des colluvions de pente sera abordé au chapitre III-6.

4. CONCLUSION A L'ETUDE DES RELATIONS GENERALES SOLS-MILIEUX

L'étagement altitudinal des sols, décrit par LEGROS et CABIDOCHÉ (1977), PELISSONNIER (1978), ROBERT et al. (1980) dans la vallée de Chamonix, est nuancé dans le détail par toute une série de facteurs stationnels. Sur la base des observations très globales présentées ici, il nous est possible d'énoncer les grands facteurs stationnels qui confèrent aux sols d'un étage bioclimatique donné, des caractères morphologiques particuliers. Il s'agit de :

- La stabilité du milieu
- La présence d'un substrat compact imperméable dans le volume de matériau intéressé par la pédogenèse
- Le degré de fragmentation du matériau dans lequel se développe le sol

Présence d'un substrat compact	Alpin Ranker alpin — Ranker à mor Sol crypto-podzolique noir — Podzol humoferrugineux Sol ocre podzolique et podzol alpin — Subalpin Ranker hydromorphe — Ranker tourbeux Lac — Tourbe
Matériau profondément fragmenté	Alpin Ranker cryptopodzolique brun — Podzol Sol ocre podzolique — Podzol ou sol ocre podzolique Subalpin
Matériau très fragmenté ou fragmenté avec concentration de matériau très fragmenté en surface	Alpin Stagnogley (podzolique) — Podzol ferrugineux Sol podzolique à Bh profond — Sol ocre podzolique Subalpin

Tableau 7 :Correspondance entre sols alpins et subalpins, développés dans des milieux identiques.

- La fourniture hydrique
- L'exposition

La comparaison "à facteurs constants" des sols développés aux différents étages bioclimatiques (Tableau 7) confirme l'étalement altitudinal des sols. Elle souligne par ailleurs la forte réduction de la diversité des sols sous l'influence de la podzolisation, lorsque l'on descend de l'étage alpin à l'étage subalpin. Cette diversité se réduit encore à l'étage montagnard, du fait de l'importance des remaniements.

L'action de chacun de ces facteurs s'exerce dans un champ particulier et suivant des modalités spécifiques :

La stabilité du milieu

La stabilité est le facteur prépondérant en ce qui concerne la distribution des sols d'un étage bioclimatique donné, dans la mesure où elle contrôle en dernier lieu le degré de différenciation morphologique des profils. Son influence est double : elle détermine la durée de la pédogenèse sur un matériau donné, mais aussi la conservation d'anciens pédogenèses correspondant à des phases climatiques différentes de l'actuelle. La présence de podzols, dans des positions très stables aux étages montagnards, subalpins et alpins montre que l'étalement bioclimatique s'exprime très mal dans de telles positions. Par conséquent, la recherche de sols en équilibre avec leur milieu ne doit pas être effectuée dans les zones les plus stables, et ceci même dans le cas de sols très jeunes. A l'opposé, les milieux très instables ne permettent pas, du fait des remaniements constants qui affectent les sols, l'expression de l'étalement bioclimatique altitudinal.

La présence d'un substrat compact limite le développement des profils et confère aux sols un caractère

humifère. Elle détermine des fournitures hydriques latérales et concentrées, fréquentes à l'étage alpin. Son influence est réduite dans les sols généralement plus fragmentés de l'étage subalpin et devient négligeable à l'étage montagnard.

Le degré de fragmentation du matériau est très variable dans l'espace mais aussi en fonction de la profondeur et résulte de transferts de particules dans les profils et le long des pentes, en relation avec l'instabilité du milieu :

- Dès le dépôt des formations superficielles, on observe dans les sols qui s'y développent des organisations à coiffes et à vides d'entassement qui témoignent d'un soutirage intense de particules fines. A partir d'un matériau peu fragmenté (éboulis) ce type de phénomène peut conduire à la formation d'horizons "caverneux" à vides d'entassement entre les éléments grossiers.
- Sur les pentes se forment à travers des mécanismes de tri sélectifs, des concentrations d'éléments fins à grossiers en surface. Ces mécanismes restent actifs tant que la surface du sol n'est pas protégée par une couverture végétale dense. De ce point de vue, l'instabilité du milieu peut être à l'origine, à travers des concentrations de particules fines ou grossières en surface de certains types de sols (sol podzolique à Bh profond par exemple) qui présentent une distribution granulométrique très différente de celle de la formation superficielle initiale.

Ces distributions sont à l'origine de la diversité des sols de l'étage alpin. Elles sont "masquées" à l'étage subalpin par la podzolisation. Cependant les podzols

présentent des caractères différents suivant le degré de fragmentation du matériau : les horizons spodiques développés dans des matériaux fragmentés sont indurés. Ils sont meubles dans des matériaux très fragmentés. Enfin, les sols développés dans des matériaux peu fragmentés sont très généralement humifères. Ce caractère humifère se manifeste jusqu'à une profondeur qui apparaît généralement liée à la densité et à la profondeur de l'enracinement.

La fourniture hydrique

Son influence se fait sentir à l'étage alpin où les horizons d'accumulation très développés sont généralement associés à des fournitures hydriques concentrées. Par contre, aux étages subalpin et montagnard, cette relation n'est pas évidente, en raison d'une part de la quasi-généralisation des couvertures profondément fragmentées, et d'autre part, de l'importance des phénomènes de remaniements qui tendent à masquer l'effet de dynamiques hydriques particulières.

L'exposition des stations

Facteur très global, que nous tenterons de "disséquer" ultérieurement (cf. Chapitre III), elle nous semble partiellement responsable de l'opposition observée entre les sols subalpins des deux versants de la vallée. Cela n'est pas surprenant, étant donné la position biogéographique de la vallée de Chamonix, à la charnière entre les Alpes externes humides où la différence adret-ubac est peu sensible, et les Alpes internes, plus sèches où elle est fondamentale (CADEL, 1980). De même que pour le gradient bioclimatique, son influence ne se fait sentir qu'en position instable et plus particulièrement dans des matériaux très fragmentés.

Par ailleurs, deux types de microclimats opposés ont été remarqués comme imprimant au sol des caractères particuliers :

- Les combes à neige (enneigement cumulé) se traduisent dans les profils par des traces d'hydromorphie.
- Les crêtes ventées (faible enneigement hivernal) ; les sols présentent alors un caractère humifère marqué.

Dans la première partie de ce travail, nous avons ainsi décrit l'étagement bioclimatique altitudinal et montré que celui-ci s'exprime différemment à l'intérieur d'un étage, en fonction de certains caractères précis du milieu.

Nous avons mis en évidence en particulier, la grande diversité des sols de l'étage alpin, diversité que les auteurs anciens n'avaient peut être pas suffisamment soulignée. A la lumière des observations faites, il faut maintenant abandonner la vision schématique et fautive d'une haute montagne cristalline uniformément recouverte, affleurements exceptés, des sols "peu évolués", du type ranker alpin.

La prospection effectuée nous a, par la même occasion, permis de sélectionner une séquence de sols représentatifs. Sur ces sols nous allons chercher à mettre en évidence les mécanismes par lesquels, l'étagement bioclimatique détermine un étagement des sols.

C H A P I T R E I I I

CHAPITRE III

FONCTIONNEMENT ACTUEL D'UNE SEQUENCE DE SOLS

1. PRESENTATION

1.1 - INTRODUCTION

Pour tenter de comprendre de quelle manière et à travers quels processus, l'étagement du climat et de la végétation interviennent pour déterminer, dans des conditions particulières, un étagement des sols, nous avons étudié 4 stations de référence, choisies pour leur représentativité et pour leur intérêt pédogénétique :

- A l'étage alpin (2350 m) Nivose : pelouse à *Carex curvula*, ranker humifère "cryptopodzolique" (noir) développé dans un microéboulis stabilisé reposant sur une dalle de gneiss moutonné.
- A l'étage subalpin (1950 m) Lognan : lande à rhododendron, podzol humoferrugineux sur moraine glaciaire.
- A l'étage montagnard (1200 m) Lavancher : pessière à myrtille, sol brun faiblement ocreux sur colluvions de pente.

Une quatrième station a été choisie à la fois pour son intérêt pédogénétique et agronomique, et du fait de travaux antérieurs menés à la Station de Science du Sol de Versailles sur le même type de roche-mère (van OORT, 1984).

- A l'étage alpin (2200 m) Balme : pelouse à Nard et canche flexueuse, sol "podzolique" sur calcschistes.

Les sols de ces stations ont été décrits et analysés à différentes échelles. Parallèlement, nous avons installé dans chacun de ces sites, des dispositifs expérimentaux permettant la collecte d'informations concernant :

- **Leur pédoclimat** : nous avons mesuré la température en continu à différents niveaux, ainsi que l'évolution saisonnière de la teneur en eau des sols.
- **Leur fonctionnement biogéochimique** : des batteries de lysimètres semiquantitatifs ont été installés pendant l'été 1983. Les eaux de percolation rapide ont été prélevées en continu après chaque séquence pluvieuse pendant toute l'année 1984. Parallèlement, nous avons introduit dans les sols des minéraux tests pour caractériser le pouvoir d'altération et l'ambiance chimique des horizons.
- **Les modalités de la biodégradation** : nous avons mesuré la productivité végétale des stations, suivi l'évolution pondérale et morphologique de litières tests et mesuré les dégagements de gaz carbonique à la surface du sol. Un inventaire succinct de la faune du sol a été réalisé.

Les résultats sont détaillés dans ce chapitre, station par station. Une synthèse générale est présentée au chapitre IV.

1.2 - REPRESENTATIVITE CLIMATIQUE DE L'ANNEE ETUDIEE

La pluviométrie de l'année 1984 pendant laquelle des dispositifs expérimentaux d'étude des sols ont fonctionné, se caractérise (Fig.8) par deux périodes relativement sèches, l'une couvrant les mois de juillet et d'août, l'autre apparaissant du 10 octobre au 15 novembre, et par une séquence de fortes pluies entre les deux (3 septembre - 8 octobre). La sécheresse estivale (118 mm pour juillet et août) a été plus marquée qu'en moyenne (257 mm). De même, la pluviométrie totale annuelle pour la période qui nous intéresse (décembre 1983 - décembre 1984) est légèrement déficitaire (1130 mm contre 1220 mm) par rapport à la moyenne. Les températures enregistrées à Chamonix n'ont par contre, pas montré d'écart notable avec la moyenne.

Il s'agit donc d'une année relativement représentative, bien que légèrement plus sèche, du régime climatique moyen de la vallée. A l'inverse, l'été (1983) a été le plus sec et le plus chaud qui ait été enregistré depuis 40 ans. Cette sécheresse exceptionnelle pourrait expliquer en partie certaines "anomalies" mesurées pendant l'hiver 1983-1984 dans les stations à haute altitude.

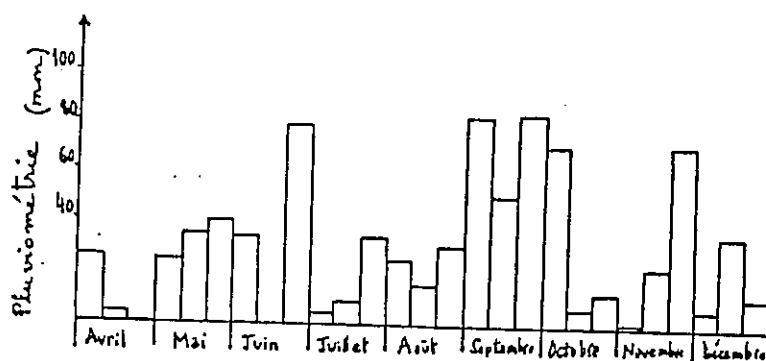


Fig. 8 Pluviométrie mensuelle Année 1984
(Source Météo Chamonix)

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 - MATERIEL ET METHODE DE MESURE DE LA TEMPERATURE

- Etage montagnard et subalpin -

Les températures ont été enregistrées à 10 cm au-dessus du sol (thermo-enregistreurs METEO déposés sur le sol et protégés par une boîte blanche ajourée) et à -10 cm et -40 cm dans le sol (thermo-enregistreurs à sonde J. Richard). Au Lavancher, nous avons remplacé un appareil défectueux qui enregistrerait la température à -40 cm par des thermomètres mini-maxi de précision (mercure, alcool). Les enregistreurs ont été remontés et recalés chaque semaine.

- Etage alpin -

Les températures de l'air à 2 m au-dessus du sol et dans les sols de deux stations contigües, ont été mesurées par des thermocouples. Les valeurs, enregistrées à certaines heures de la journée (entre 0 et 5 fois par jour), sont transmises à une balise émettrice, reliée par satellite, au Centre d'Etude de la Neige de Grenoble. Les sondes sont implantées à -10 cm et -25 cm dans un sol noir à Polytric sexangulaire, et à -10 cm et -30 cm dans un ranker crypto-podzolique, sous une pelouse à Carex curvula.

La variété de matériel employé soumis à des conditions de travail relativement rudes pendant un temps assez court, (moins d'une année), rend toute valeur absolue comme toute extrapolation critiquable. Les évolutions relatives présentées nous semblent par contre représentatives.

2.2 - MATERIELS ET METHODES UTILISES POUR L'ETUDE DES TENEURS EN EAU

Les différents horizons des sols de trois stations (Balme, Lognan, Lavancher) ont été prélevés périodiquement dans des boîtes métalliques (250 cm³) fermées hermétiquement. Les échantillons sont pesés avant et après passage à l'étuve (110°C une nuit), puis tamisés pour ramener la teneur en eau au poids de terre fine (< 2 mm).

2.3 - MATERIELS ET METHODES UTILISES EN LYSIMETRIE

2.3.1 - Prélèvement des eaux de gravité

Les lysimètres employés sont fabriqués à partir de tubes en PVC "pression" (épaisseur 7 mm, diamètre 125 mm) découpés en gouttières sur les 3/4 de leur longueur et taillés en pointe à leur extrémité (BOUDOT, 1982, communication personnelle). Deux longueurs sont employées, indifféremment 60 cm, et 45 cm sauf lorsqu'il s'agissait d'horizons très chargés en éléments grossiers pour lesquels des gouttières très courtes ont été employées (25 cm).

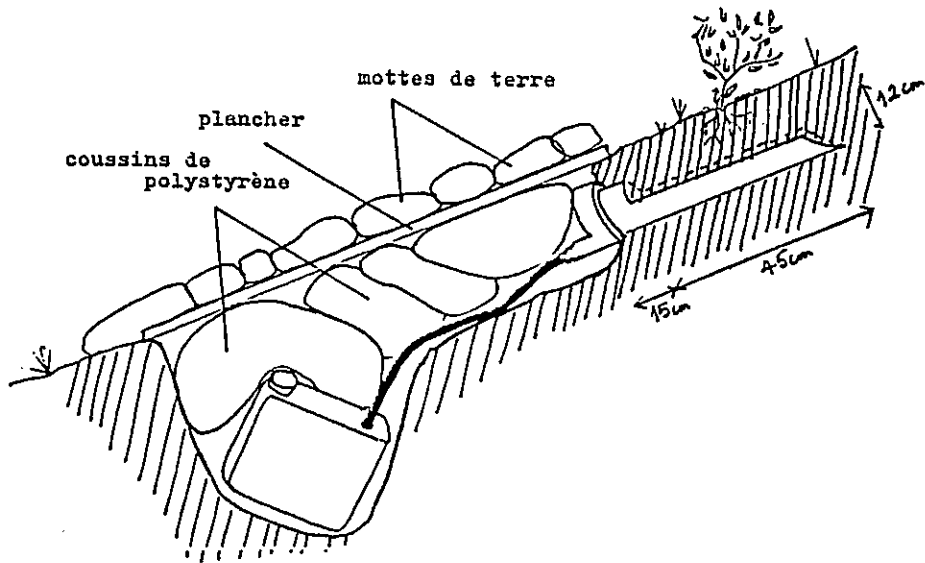


Fig. 9 : Schéma du dispositif lysimétrique

A partir d'une tranchée, une, deux ou trois gouttières latéralement espacées d'environ 50 cm chacune sont enfoncées à force, dans le sens de la pente amont, parallèlement à la surface du sol, dans les horizons concernés. L'extrémité affleurante est équipée d'un bouchon percé et d'une tétine reliée par un tuyau en polyéthylène à un récipient en PVC de 20 ou 30 litres, situé dans une fosse en contrebas (Fig.9). La fosse, bourrée de coussins de polystyrène expansé, est dissimulée par un plancher en bois sur lequel sont déposées des mottes de terre (A_0/A_1) ce qui permet d'éviter les curieux et surtout de maintenir une température du sol proche des conditions normales. Les lysimètres les plus profonds sont enfoncés à 50 cm de profondeur, mais en général celle-ci ne dépassait pas 30 cm.

Ce dispositif a été adopté de préférence à des lysimètres fermés, du fait de la pente, de la pierrosité et des dynamiques hydriques latérales qui caractérisent les sols étudiés. Par ailleurs, les espèces végétales enracinées sur les lysimètres n'ont jamais manifesté de comportement particulier par rapport à leurs voisines.

Au printemps 1985, nous avons "autopsié" certaines de ces gouttières, ce qui nous a permis les observations suivantes :

- Aucune modification apparente de la structure du sol situé au-dessus du volume défini par l'enveloppe du lysimètre.

- Une modification de la structure du sol (moins nette, plus lâche) situé dans la gouttière et en particulier un "lissage" au contact de la paroi.

- Une absence de traces d'hydromorphie.

Il est évident que l'implantation de tels dispositifs modifie partiellement le régime hydrique et la vitesse d'infiltration des solutions. Les précautions prises, faible profondeur, et forte inclinaison des dispositifs, nous permettent cependant de penser que ces modifications sont faibles et ne perturbent pas profondément la régulation par le sol de la composition géochimique des eaux gravitaires. En tout état de cause, la comparaison des hauteurs d'eau équivalentes recueillies par les lysimètres nous permettra dans chaque station de discuter des modifications éventuelles du régime hydrique.

Les gouttières sont visitées après chaque période pluvieuse. Certaines stations l'ont été moins souvent que d'autres pour des raisons d'éloignement ou parce qu'elles drainaient peu. Après évaluation du volume total, une fraction aliquote est prélevée et rapidement congelée.

2.3.2 - Techniques d'analyse

De retour à Paris, après décongélation et mesure du pH, les eaux ont été filtrées sous pression d'azote sur des filtres cellulosique (Sartorius) de porosité 0,01 μm et acidifiées au Laboratoire de Géochimie de l'Université Paris VII. Ca, Na, K, Mg, Al, Fe, Si, Mn ont été dosés en torche à plasma au Laboratoire d'Analyses d'Arras. Nitrate et ammoniacque ont été dosés par colorimétrie à la Station de Science du Sol de l'INRA de Versailles sur un analyseur automatique Quanta.

Le carbone a été dosé en phase liquide après barbotage à l'azote au C.R.G. de Thonon-les-Bains sur un Dohrman Carbon Analyseur Horiba Pir 2000.

Les résultats exposés sont exprimés en ppm de façon à pouvoir raisonner en termes de flux. Ils ont été arbitrairement répartis sur trois graphiques pour des raisons de lisibilité.

Note : le terme de "base", couramment employé en Science du Sol est impropre, car il désigne des acides conjugués de bases fortes. Nous l'avons néanmoins utilisé du fait de sa brièveté.

2.4 - MATERIEL ET METHODE D'UTILISATION DES MINERAUX TESTS

2.4.1 - Présentation

La méthode des minéraux tests (BERTHELIN *et al.*, 1983 ; RANGER, 1985) consiste à introduire dans les sols, aux profondeurs que l'on veut étudier, un minéral pur de composition bien connue dont on va suivre l'évolution au cours du temps.

Le minéral utilisé est une vermiculite "Espagne" à forte capacité d'échange (116 meq/100 g). Son étude aux rayons X après différents traitements montre qu'il est constitué essentiellement de feuillets vermiculite avec cependant une faible partie chloritique et une partie interstratifiée (10-14 A).

Le minéral, broyé et tamisé entre 50 et 100 μm , est saturé au baryum, puis introduit à raison de 3 g par sachets, dans des sachets en polyamide imputrescible de 10 x 5 cm et de 20 μm de maille. Les sachets sont implantés latéralement dans les horizons du sol, à partir d'une tranchée creusée perpendiculairement à la pente. La tranchée est rebouchée en respectant l'ordre des horizons. Deux sachets par horizon ont été introduits dans chaque station étudiée, en octobre 1983. Nous avons prélevé un sachet sur deux en juin 1984 et le restant en octobre 1984.

Sur chaque échantillon sont pratiquées les analyses suivantes :

- Capacité d'échange et saturation (Ca, K, Na, Mg, Mn, Al, Fe)
- Acidité totale d'échange
- Eléments libres (Al et Fe Tamura)
- Minéralogie.

2.4.2 - Interprétation

L'interprétation des résultats est basée sur les principes suivants (ROBERT, 1979 ; RANGER, 1985) :

Le minéral, placé dans les conditions du sol subit une destabilisation, en milieu lessivant, sous l'influence des eaux de drainage chargées en acides organiques et minéraux dilués.

La capacité d'échange, initialement saturée Baryum, va évoluer pour s'équilibrer avec le milieu : dans les milieux acides et complexants (podzolisation), les cations peu complexés (Mg, Ca) s'accumulent relativement, tandis que l'aluminium, fortement complexé, est éliminé. On observe alors une stabilisation ou une régression de l'aluminium interfoliaire ce qui se traduit par une stabilité ou une

augmentation de la capacité d'échange.

A l'inverse dans les milieux acides non complexants, (brunification) l'aluminium accumulé s'hydroxyle et s'intègre dans les minéraux sous forme de cales interfoliaires. Cette fixation d'aluminium "libre" entraîne une diminution de la CEC et un blocage des feuillets, aisément observable aux rayons X.

Enfin, l'évolution de la garniture cationique des minéraux se fait en fonction de la disponibilité relative des éléments provenant de la minéralisation des litières. Par ce biais, elle traduit l'activité du cycle biologique.

Ce comportement, observé en laboratoire par ROBERT (1979) et sur le terrain, à travers des minéraux identiques par RANGER (1985) doit être cependant transposé avec précaution, car nous ne disposons pas de références pour des séjours dans les sols aussi courts que ceux de notre étude.

2.5 - MATERIEL ET METHODES POUR L'ETUDE DE LA MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE DU SOL ET DE LA NITRIFICATION D'UNE SOLUTION D'AMMONIUM AJOUTEE

Mode opératoire (SIMON SYLVESTRE (1979))

Les différents essais, tous en double exemplaire, sont effectués dans des flacons de 250 ml à large ouverture, fermés avec un film de polyéthylène, perméable aux gaz (l'humidité des essais est ainsi maintenue constante au cours de l'incubation), contenant un poids de terre humide équivalent à 50 g de terre sèche, mélangé à 50 g de sable siliceux, sec et pur (diamètre compris entre 1 et 3 mm).

Le tout est amené à une humidité voisine de 50 % de la capacité de saturation de la terre.

L'incubation est réalisée à 25° et deux durées d'incubation ont été envisagées dans cette étude : 8 et 30 jours.

Dans le cas de l'étude de la nitrification, un sel d'ammonium (sulfate) a été ajouté dans le milieu, soit 10 mg d'N ammoniacal pour l'équivalent de 50 g de terre sèche : il est naturellement tenu compte du volume de cette solution ammoniacale pour l'humectation des échantillons.

Après incubation, l'azote minéral des échantillons (N ammoniacal, N nitreux et N nitrique) est extrait par agitation des mélanges (sable + terre) avec du chlorure de potassium N/2 dans le rapport 1/2,5. Dans le filtrat, sont alors dosées les différentes formes d'azote minéral à l'aide d'analyseur automatique d'azote, type Quanta.

2.6 - MATERIELS ET METHODES UTILISES EN RESPIROMETRIE

Le CO_2 se dégageant à la surface du sol, a été recueilli² par de la chaux sodée placée à l'intérieur d'une cloche de Lundegårdh (in DOMMERGUES, 1968) artisanale : la base est constituée d'un tube de PVC de 10 cm de haut et 15 cm de diamètre enfoncée à force dans le sol dont la végétation a été arrachée. La cloche est constituée d'un bol en plastique encapuchonné dans un tissu d'aluminium pour éviter l'échauffement dû au soleil. 15 g de chaux sodée environ sont pesés après dessiccation (une nuit à 80°C), avant et après incubation. L'incubation dure une semaine. Quatre répétitions sont effectuées par station.

Bien que peu précise, (le dégagement de CO_2 recueilli intègre la respiration racinaire), cette méthode a été choisie du fait de sa simplicité et de sa représentativité.

2.7 - MATERIELS ET METHODES UTILISES POUR L'ETUDE DES PREMIERS STADES DE LA BIODEGRADATION

Pour tester le comportement des litières de chaque station lors des premiers stades de la biodégradation, nous avons déposé dans trois stations étagées, Nivose, Lognan et Lavancher, toute une gamme de litières et de substrats :

- litières fraîches : Erable (*Acer pseudoplatanus*)

Myrtille (*Vaccinium myrtillus* et
uliginosum)

Carex (*Carex curvula* et
sempervirens)

Rhododendron (*Rhododendron*
ferrugineum)

- litière âgée de six mois : rhododendron

- feuilles vertes d'hiver : rhododendron

Les différentes litières et feuilles de rhododendron ont été employées pour simuler une évolution à long terme. (Nous avons choisi le rhododendron car ses feuilles se fragmentent peu). Les litières ont été récoltées sous la plante, grâce à des filets, ou coupées à l'automne (*Carex*) ou en hiver (feuilles vertes de rhododendron).

Après séchage à l'étuve (40°C pendant une nuit), environ 10 g de litière, sont pesés, puis introduits dans des sachets de 20 cm de côté fabriqués à partir d'un treillis souple en plastique de 2 mm de maille. Cette taille de maille, choisie pour ne pas limiter l'activité de la faune, nous a contraint à ne pas prendre en compte la litière d'épicéa.

Par ailleurs, des buchettes d'aulne vert, d'environ 1 cm de diamètre et des disques de papier filtre en cellulose (DURIEUX), préparés dans les mêmes conditions, nous ont servi de modèle pour la ligninolyse et la cellulolyse. Dix sachets de chaque substrat ont été déposés dans chacune des trois stations à l'automne (novembre 1983). Trois de ces sachets ont été prélevés au hasard à la fin juin 1984 dans les trois stations. Cette date correspond exactement à la fonte de la neige aux étages subalpins et alpins. Au montagnard par contre, la neige avait déjà disparu depuis deux mois.

Les sachets restants dans chaque station ont été prélevés à l'automne (quelques sachets recouverts par la neige n'ayant pu être retrouvés, nous n'avons pu les prélever qu'en juillet 1985).

Parallèlement, pour tester uniquement la biodégradation estivale, trois sachets contenant des litières d'érable et trois sachets de feuilllets vertes de rhododendron, ont été déposés à la fin juillet dans les stations concernées et relevés en novembre.

Après prélèvement, les sachets sont examinés, leur aspect décrit, puis ils sont nettoyés afin de les débarrasser d'une grosse partie des pollutions organiques et minérales. Cette opération élimine de fait une petite partie des fragments de petite taille. Les sachets sont alors ouverts, leur contenu est séché (40°C une nuit), puis pesé. La perte de poids mesurée correspond donc à la somme : $P = \text{minéralisation} + \text{lessivage} + \text{fragmentation (mésafaune)} - \text{pollutions diverses (déjections, fragments végétaux, hyphes)}$. Pour les trois stations, nous avons observé à la loupe binoculaire les caractères morphologiques de chaque substrat, puis des échantillons représentatifs ont été examinés, en surface et en coupe, au microscope électronique à balayage.

2.8 - MATERIEL ET METHODE D'EXTRACTION DE LA FAUNE

La faune des sols des quatre stations étudiées a été extraite et identifiée au Laboratoire de Biologie Animale du Museum de Brunoy sur des prélèvements de juillet 1985 (période chaude et humide). La méthode employée est celle des entonnoirs de Berlese dont l'action repose sur une lente dessiccation du milieu. Cette méthode présente un excellent rendement d'extraction vis-à-vis des micro-arthropodes du sol (PONGE, 1984). Son efficacité est faible vis-à-vis des enchytréides et des larves d'insectes et nulle en ce qui concerne les nématodes. Aussi, ces groupes peuvent être fortement sous-estimés dans les inventaires présentés. Les lombrics ont été extraits par arrosage du sol en place au formaldéhyde dilué (BACHELIER, 1971).

3. NIVOSE : RANKER "CRYPTOPODZOLIQUE" HUMIFERE SOUS PELOUSE ALPINE

3.1 - PRESENTATION DE LA STATION

La station de Nivose se trouve dans le Massif des Aiguilles Rouges, à l'Est du lac Blanc, au-dessus des lacs des Cheserys, à une altitude de 2350 m.

Elle s'intègre dans un vaste ensemble de roches moutonnées, les sols n'occupant que les pentes faibles et les creux. Il s'agit d'une de ces pentes moyenne, de faible superficie (200 m²), grossièrement plane, et inclinée vers le Sud-Est. Une petite barre rocheuse surplombe la pente à l'amont et la limite à l'Est. La pente s'adoucit à l'aval et vers l'Ouest pour former une cuvette dont la plus grande partie est couverte par une mare. La quasi-totalité de la pente est occupée par des rankers cryptopodzoliques "noirs" développés dans des matériaux grossiers et reposant sur la dalle rocheuse en pente. A l'amont apparaissent, lorsque la pente est plus forte, des rankers alpins. A l'aval, des rankers hydromorphes et des sols noirs initiaux de combe à neige à *Polytrichum sexangulare*. La végétation est une pelouse rase à *Carex curvula* (RICHARD, 1975). Des blocs et cailloux, assez nombreux, colonisés par les lichens sont encastrés dans la végétation en surface.

- Végétation succincte :
- 3 *Carex curvula*
 - 2 *Carex sempervirens*
 - 1 *Nardus stricta*
 - 1 *Vaccinium uliginosum*
 - + *Juniperus nana*
 - + *Homogyne alpina*

20 % environ de la surface est occupée par des blocs lichenisés.

3.2 - DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DU SOL DE REFERENCE

3.2.1 - Description du sol

1 cm A ₀	débris végétaux fragmentés reconnaissables et micro-agrégats, sans grains minéraux visibles. Transition rapide.
1-10 cm A ₁ /A ₂	brun noirâtre humide (brun foncé 7,5 YR 3/2 à sec) à brun grisâtre foncé en descendant. Structure microagrégée. Enracinement très dense. A la partie inférieure, on observe des liserés discontinus plus clairs de grains minéraux propres. Nombreux cailloux et graviers. Transition diffuse.
10-40 cm Bh	noir humide (brun rougeâtre foncé 5 YR 3/3 à sec). Structure floconneuse peu ferme. Sous-structure microagrégée. Très nombreux blocs et cailloux enduits de brun rougeâtre foncé. Assez nombreuses racines. Dalle gneissique peu altérée en surface revêtue d'une natte de racines et enduite de brun rougeâtre foncé.

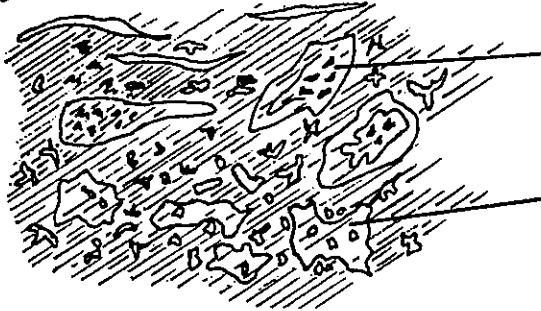
3.2.2 - Organisation et micro-analyse de quelques constituants

Des lames minces, imprégnées à l'état humide, des horizons A₀ A₁ et Bh ont été décrites (Fig.10) en nous limitant aux caractères qui nous ont semblé être les plus en rapport avec le fonctionnement du sol. Certains constituants ont été analysés ponctuellement à la sonde.

L'évolution relative des proportions et de la composition de quelques constituants est présentée ci-dessous (Tableau 9).

Fig 10 : Organisation, à l'échelle microscopique
des horizons du sol de NIVOSE

A0



1 mm

microagrégats (100 à 200 μ) holorganiques, de forme découpée, en amas ou isolés, disséminés entre ou à l'intérieur des fragments végétaux.

agrégats anguleux et découpés (0,5 à 1mm) contenant quelques rares éléments de squelette et de très nombreux fragments végétaux peu reconnaissable

A1



0,5 mm

agrégats brun clair, très poreux, formés de chapelets de microagrégats jointifs (50 à 100 μ) arrondis, organominéraux

agrégats organominéraux brun foncé, denses, plasma isotique squelette limoneux et sableux orienté en tous sens

nombreux globules arrondis noirâtres isotiques à structure racinaire

lithorelique ferruginisée non revêtue, les zones ferruginisées affleurent à la surface sans deferruginisation visible

Bh



0,2 mm

agrégats polyédriques formés de microagrégats arrondis (100 à 200 μ), le plus souvent jointifs, formés par un plasma brun plus ou moins foncé, isotique englobant de nombreux grains de squelette ; forte porosité d'entassement interagrégats et nombreux canaux biologiques

nombreuses plages rougeâtres à noirâtres, denses, isotiques associées aux lithoreliques ou disséminées dans le plasma et recoupée par la porosité biologique

lithoreliques présentant des plages de micas ferruginisés et quelques vides de dissolution (pyrite ?) occupés par des glébulles anguleux riches en fer ; les lithoreliques sont revêtues d'un plasma brun

nombreux glébulles arrondis noirâtres à structure racinaire

TABLEAU 9

Proportion relative de quelques constituants

Horizon	A ₁	Bh
Présence de lithoreliques ferruginisées	faible	élevée
Présence de plages rougeâtres isotropes riches en Fe et Al	faible	très élevée
Présence de sclérotés ou de fructifications mycéliennes mélanisées	nombreux	nombreux
Porosité	forte	forte
Teneurs en Fe et Al du plasma	faible	plus élevée

Les éléments grossiers présents dans le sol sont des gneiss dont les minéraux constitutifs sont quartz, micas, feldspaths, et en faible quantité grenat et pyrite. La fragmentation de ces éléments fournit au sol de très nombreuses lithoreliques de petite taille, présentant des plages de micas ferruginisés et des concentrations anguleuses de fer résultant de l'oxydation des pyrites. Ces lithoreliques sont peu abondantes en A₁ et souvent isolées dans les vides. En Bh, elles sont très abondantes et généralement englobées dans le plasma.

Le plasma très abondant, isotique en A₁ comme en Bh, est structuré en micro-agrégats jointifs. Il est plus riche en fer et en aluminium en Bh, sans cependant que les domaines soient profondément distincts (Fig.11)

On observe en Bh de nombreuses plages rougeâtres foncées, denses, lisses, constituées de fer, d'aluminium et de traces de titane (Fig.11). Les plages sont associées aux lithoreliques ou isolées dans le plasma et recoupées par la porosité biologique. Elles sont reprises sous forme de petits fragments dans les micro-agrégats. Elles ne sont ni en relation avec les vides, ni avec une structure biologique

et semblent donc relictuelles.

On observe dans tout le profil, des granules noirs, opaques, arrondis, d'origine fongique. Il s'agit, soit de sclérotés de *Cenococcum graniforme* (forme de résistance d'un champignon mycorhizien mélanisé), soit de fructifications d'ascomycètes (PONGE, 1985, communication personnelle). Ces organes sont depuis longtemps, reconnus comme étant très résistant à la biodégradation (MEYER, 1964).

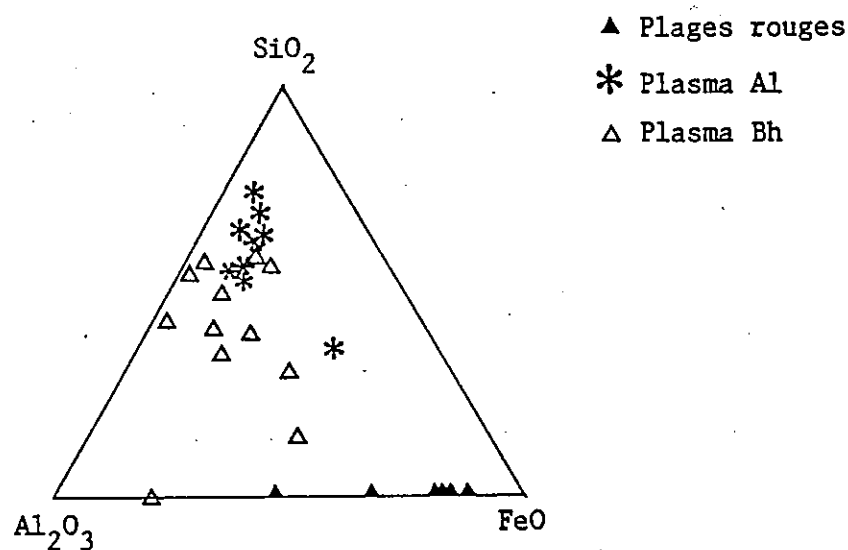


Fig.11 - Composition relative de quelques constituants

3.2.3 - Données analytiques

3.2.3.1 - Caractères généraux (Fig.12)

Le sol présente des taux de matière organique très élevés, aussi bien en surface (43 %) qu'en profondeur (28 %) de sorte que celle-ci constitue -en volume- l'élément prédominant du sol. S'y l'on ajoute à cela le fort pourcentage d'éléments grossiers (surtout en Bh), il paraît évident que la fraction minérale fine de ce sol est, du point du volume occupé, marginale. Le rapport C/N : 19 en surface, 25 en

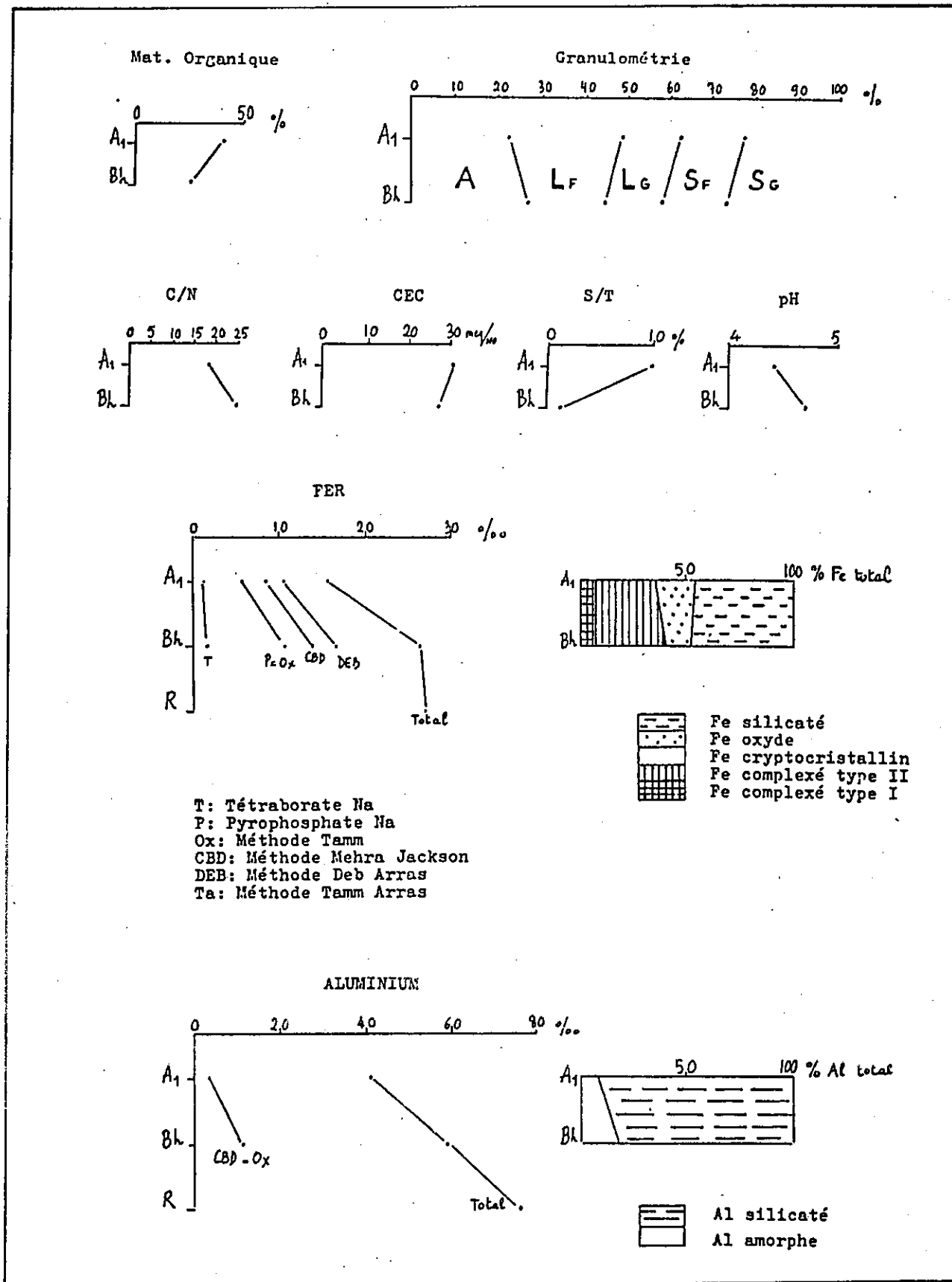


Fig. 12 : Caractères analytiques généraux du ranker humifère "cryptopodzolique" nivose

profondeur, est relativement élevé pour une végétation à dominante de graminées. La granulométrie varie peu de bas en haut. Le taux d'argile, relativement élevé (23 à 27 %) est classique à cet étage (ROBERT et al., 1981) et peut être attribué à différents facteurs (fragmentation intense de roches microcristallines, apports éoliens). Son augmentation avec la profondeur peut être due à un phénomène de lavage, lors de la mise en place du matériau ou à un lessivage ultérieur. Nous n'avons pu observer en lames minces, de traces d'illuviation d'argile. Le taux de saturation en bases est très faible en A_1 et nul en Bh. Les valeurs du pH ne sont pas très basses (4,4 à 4,7) et augmentent légèrement en profondeur.

3.2.3.2 - Evolution des formes, du fer et de l'aluminium (Fig.12)

L'interprétation des résultats est basée sur les travaux de JEANROY (1983). A l'analyse, le coeur peu altéré des blocs présents dans l'horizon Bh contient 2,7 % de fer total sous des formes cristallines diverses (micas, grenats pyrites). Ce taux est identique dans la terre fine de l'horizon Bh et diminue fortement en A_1 (1,6 %). De Bh en A_1 , calculé par rapport à la terre fine, le "fer silicaté" décroît fortement, le "fer complexé", égal au "fer amorphe", décroît, dans de plus faibles proportions, le "fer oxyde" restant constant. Estimés en valeur relative par rapport au fer total, les trois compartiments restent quasiment constants d' A_1 en Bh. L'aluminium total, maximal dans la roche décroît fortement en Bh puis en A_1 ; l'aluminium amorphe augmentant fortement en valeur absolue et relative en Bh.

3.2.3.3 - Interprétation

Le profil analytique de ce sol correspond à celui d'un ranker cryptopodzolique (CPCS). L'évolution des formes du fer traduit une amorphisation notable de cet élément. La

redistribution d'une partie du fer et de l'aluminium de haut en bas du profil est possible, mais rien au niveau de ces analyses ne permet de l'affirmer.

3.3 - PEDOCLIMAT

3.3.1 - Régime thermique

Nous ne disposons que de données ponctuelles mesurées à certaines heures de la journée (0 à 5 mesures/jour) dans deux sites - un sol noir de combe à neige à Polytrichum sexangulaire, et un ranker crystopodzolique sous pelouse - et à deux niveaux (-10 cm et -25 cm ou -30 cm). Les valeurs de la figure 13 ont été calculées en effectuant la moyenne entre la plus faible température le matin (entre 2 et 5 heures en général) et la plus élevée l'après midi (14 h à 16 h), ceci pour les seuls jours où l'on disposait de suffisamment de données.

3.3.1.1 - Analyse des données

* La période sans neige est très brève : en 1984, trois mois pour la pelouse alpine, deux mois et demi pour la combe à neige à Polytrichum sexangulaire. Pendant cette période, les températures moyennes journalières à 10 cm dans le sol sont excessivement variables.

* Les amplitudes thermiques journalières dans l'air à 2 m au-dessus du sol et dans le sol à -10 cm sont du même ordre de grandeur (Fig.14), mais la température du sol à -10 cm dépasse le plus souvent la température de l'air. Dans ces conditions d'éclairement très intense, le sol noir de combe à neige, bien alimenté en eau, s'échauffe particulièrement bien (8,5°C d'amplitude maximale journalière à -10 cm). Le sol de pelouse, beaucoup plus aéré, est moins bon conducteur.

* Les amplitudes journalières à -25 cm et -30 cm sont beaucoup plus faibles qu'en surface de sorte que, lors des

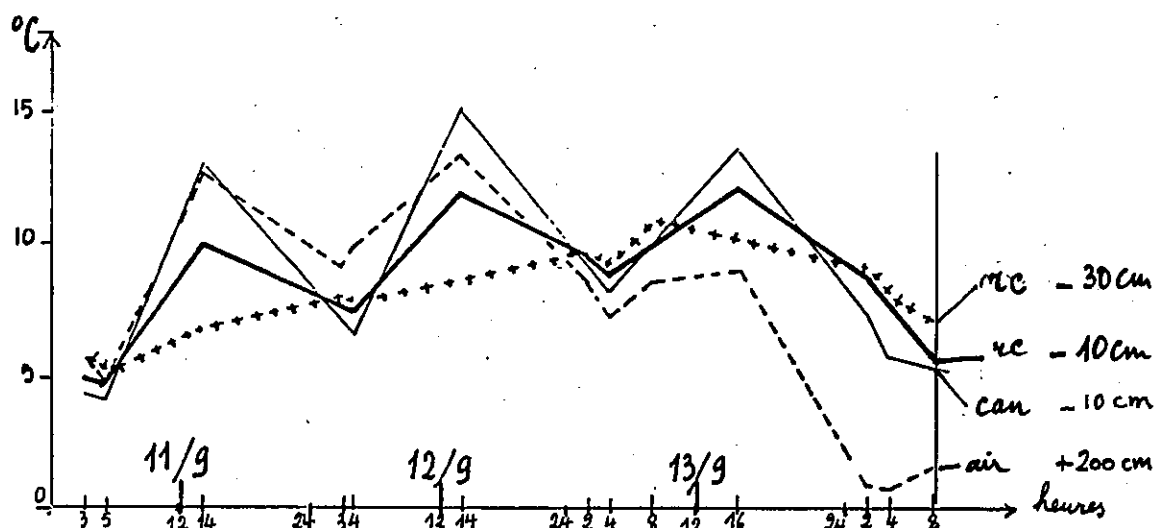


Fig. 14 : Températures mesurées dans l'air et dans le sol de deux stations contigües à l'étage alpin, à certaines heures de la journée.

Balise NIVOSE, Centre d'Etude de la Neige

rc : ranker cryptopodzolique Nivose
can : combe à neige à Polytrichum sexangula re

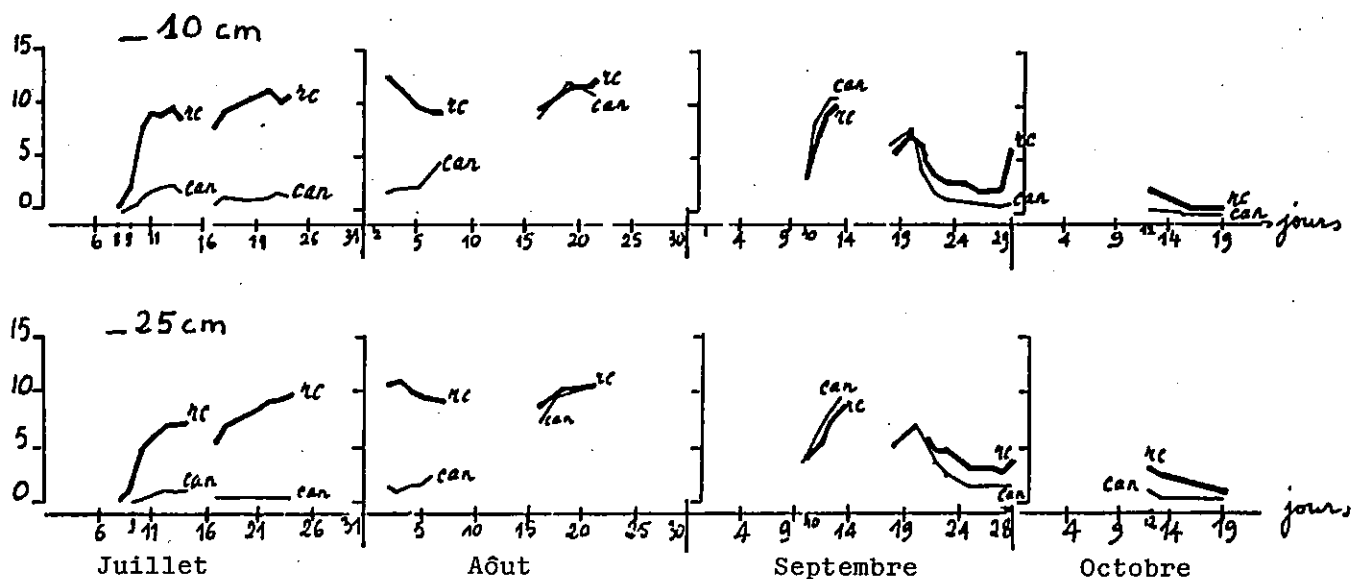


Fig. 13 : Evolution des températures moyennes journalières des sols de deux stations contigües de l'étage alpin.

périodes de refroidissement intense, les températures en profondeur sont plus élevées qu'en surface.

* Dans la station étudiée, si le sol a gelé superficiellement en automne 1984, la température à -10 cm n'est jamais tombée en-dessous de 0°C et s'est maintenue sous la neige aux environs de 0°C quelque soit la profondeur. En automne 1985, le sol n'a pas gelé. Par contre, nous avons observé des sols profondément gelés dans des stations très proches, mais moins bien exposées. En particulier les sols de l'étage alpin en face Nord des Aiguilles Rouges étaient très généralement gelés en automne 1984.

3.3.1.2 - Interprétation

Pendant la courte saison où les sols ne sont pas recouverts de neige, les températures dans l'air et dans le sol se calquent sur le flux solaire incident. L'air dont la capacité calorifique est faible à cette altitude s'échauffe peu. Les températures dans le sol à -10 cm, souvent supérieures à celles de l'air, varient considérablement et brutalement au cours du temps. Ces oscillations thermiques s'amortissent en profondeur.

3.3.2 - Régime hydrique

Le pluviomètre totalisateur que nous avons monté, s'étant fendu sous le poids de la neige, nous ne pouvons fournir de données stationnelles. Les données générales indiquent (cf. chapitre I) une pluviométrie de 2000 à 3000 mm d'eau dont plus des 3/4 sous forme de neige.

Nous n'avons pas mesuré de teneurs en eau dans ces sols du fait de l'exiguité et de l'hétérogénéité de la station. Cependant, la simple observation des profils nous a permis de constater certains caractères :

- Les horizons profonds de ces sols, ne nous sont jamais apparus secs, contrairement aux horizons superficiels.
- Lors de la fonte des neiges ou de fortes pluies, l'eau s'écoule latéralement et rapidement au contact de la dalle rocheuse. Elle continue à s'écouler plusieurs heures après l'arrêt de la pluie. Il s'agit donc là d'un "lysimètre naturel" dans lequel circule l'eau provenant du petit "bassin versant" délimité par les barres rocheuses de l'amont.

3.3.3 - Conclusion

Le pédoclimat de la station se divise en deux périodes excessivement contrastées :

- Une période hivernale d'environ neuf mois pendant laquelle le sol est froid ($+ 0^{\circ}\text{C}$), saturé en eau, et draine un volume d'eau considérable (2000 mm).
- Une période estivale courte, environ trois mois, où le sol subit des variations thermiques et hydriques brutales particulièrement en surface.

Enfin, les volumes d'eau drainés latéralement à la base du profil sont très supérieurs à ceux percolants le haut du profil.

3.4 - FONCTIONNEMENT GEOCHIMIQUE ACTUEL

3.4.1 - Etude lysimétrique

3.4.1.1 - Origine et domaine de validité des données

Deux gouttières espacées latéralement d'environ 50 cm ont été implantées dans le profil précédemment décrit. L'une à la base de l'horizon A_1 , l'autre au contact de la dalle. La charge en cailloux de la station nous a empêché d'en implanter d'autres. Les résultats présentés sont partiels

NIVOSE

A₁

BH

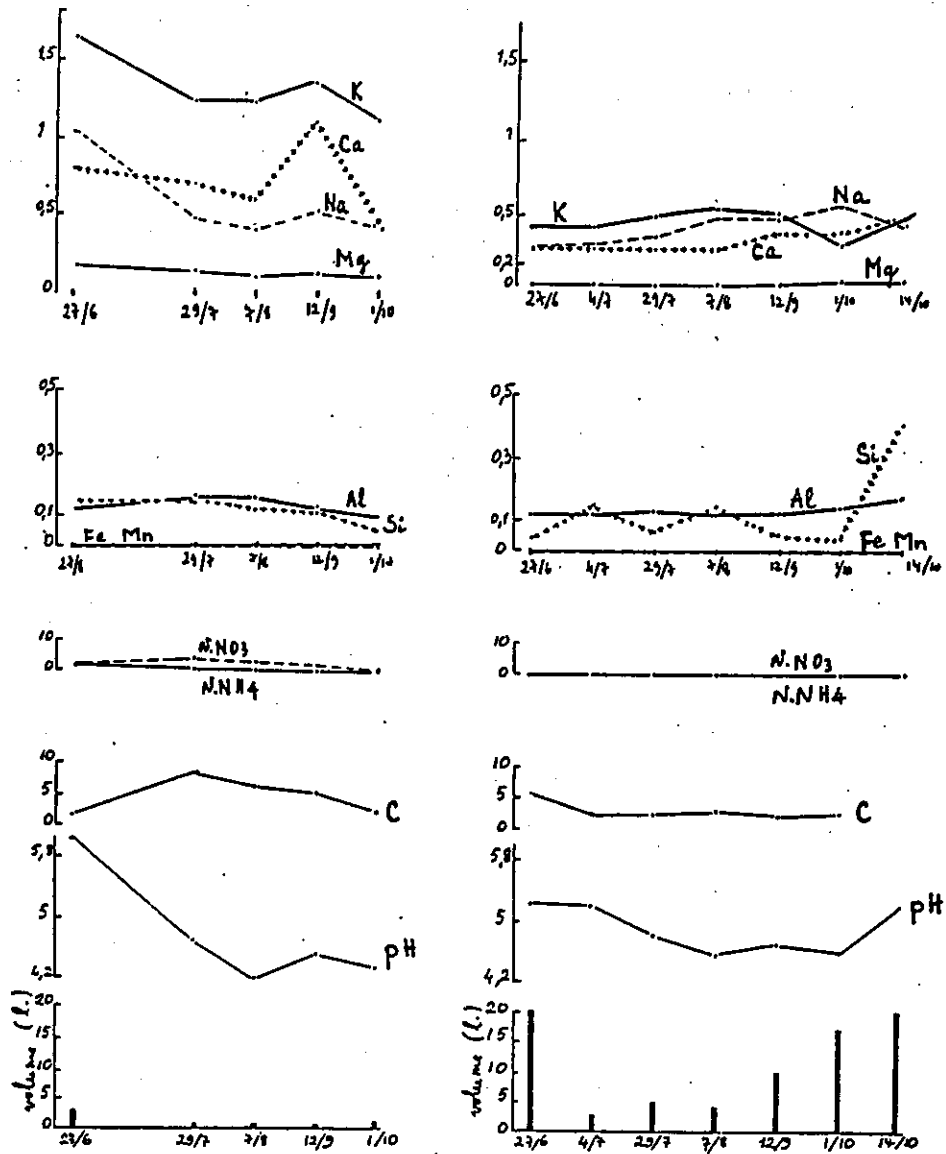


Fig. 15 : Fluctuations saisonnières des volumes drainés (litres), du pH et des concentrations (ppm) des eaux gravitaires. Lysimètres A₁ et Bh

pour les raisons suivantes :

- La présence d'une protection isolante n'a pas empêché le gel en automne 1983 du profil équipé. En juin 1984, si le sol sous la neige était dégelé, le profil équipé, l'était encore. Nous n'avons donc pu récupérer en A_1 que les dernières eaux de fonte printanières (27/6).
- La présence d'une dalle rocheuse imperméable induit une dynamique latérale profonde des solutions qui se traduit par une disproportion entre les volumes récupérés en A_1 et en Bh pour la même surface de gouttière. De ce fait, nous n'avons pu mesurer les volumes exacts drainés en Bh lors des très fortes précipitations.

La comparaison entre les concentrations mesurées en A_1 et en Bh est sujette à caution dans la mesure où la plus grande partie de l'eau récupérée en Bh ne provient pas de l'horizon A_1 immédiatement susjacent, mais du microbassin versant délimité par les barres rocheuses de l'amont.

3.4.1.2 - Analyse des fluctuations saisonnières (Fig.15)

- Calcium, potassium et magnésium, présents en concentrations relativement faible en A_1 , subissent des fluctuations peu marquées avec une baisse de K et Ca en été. Leurs concentrations diminuent fortement en Bh, sans toutefois s'annuler (sauf pour Mg), ce qui traduit un recyclage biologique imparfait.

- Les teneurs en sodium fluctuent peu et s'abaissent faiblement en Bh.

- Fer et manganèse ne sont dosables ni en A_1 ni en Bh.

- Les teneurs en Si et Al, très proches, sont faibles et relativement constantes sur l'année. Elles ne chutent pas ou peu en Bh (la disproportion entre les volumes drainés ne permet pas de comparer strictement ces mesures).

- Les teneurs en carbone, globalement faibles en A_1 augmentent cependant en été. Elles sont très faibles en Bh.

- Le pH s'abaisse en été et remonte à l'automne et au printemps, parallèlement à la dilution.

3.4.1.3 - Interprétation

Le manque de données hivernales ne nous permet pas de synthèse sur le fonctionnement annuel de ce sol. Les données estivales recueillies autorisent cependant certaines observations :

- C'est un système oligotrophe, appauvri par un recyclage biologique imparfait : calcium et potassium, présents en faibles concentrations, sont partiellement évacués latéralement dans les eaux de drainage.
- L'horizon Bh fonctionne comme un accumulateur (faible) de carbone illuvial.
- La dynamique de l'aluminium apparaît relativement indépendante de celle du carbone : les teneurs ne chutent pas ou très faiblement en Bh.
- Le fer ne semble pas migrer actuellement (dans les limites de détection des méthodes analytiques utilisées).

3.4.2 - Evolution chimique et minéralogique de vermiculite test

3.4.2.1 - Introduction

Ces minéraux ont passé huit mois (hiver) et douze mois (hiver plus été) à deux niveaux (A_1 et Bh) dans le sol. L'horizon Bh dans lequel ces minéraux ont été implantés est situé dans un microreplat de la dalle et subit de ce fait une alimentation en eau nettement supérieure à celle du sol de référence. Aussi la transposition doit être nuancée.

3.4.2.2 - Evolution chimique (Fig.16)

Evolution en A_1 : la capacité d'échange diminue très

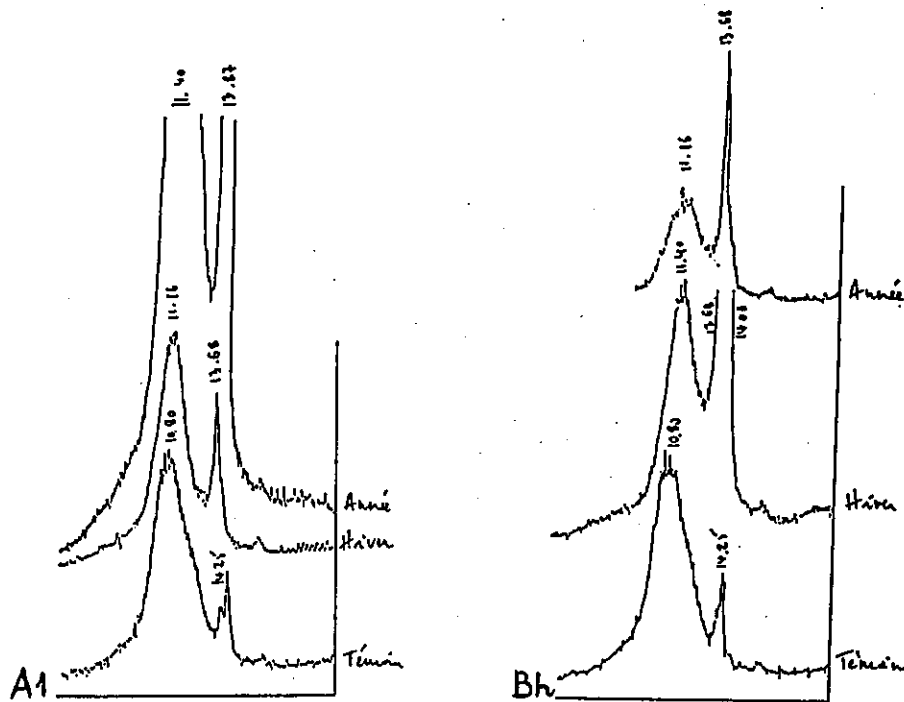


Fig. 17 : Evolution minéralogique des vermiculites en fonction de la durée de séjour des vermiculites dans les horizons du sol

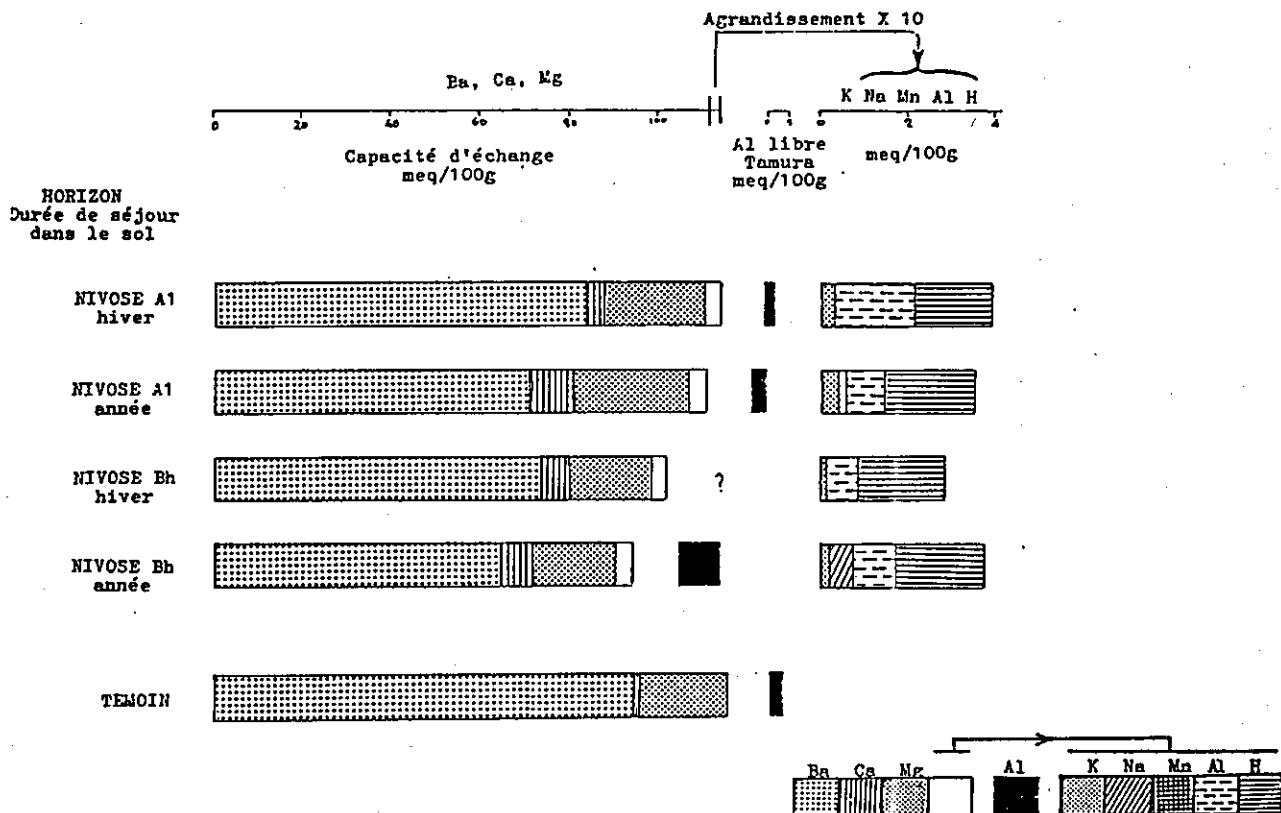


Fig. 16 : Evolution de la CEC, de l'aluminium libre et des cations échangeables en fonction de la durée de séjour des vermiculites dans les horizons du sol

faiblement au cours de l'hiver puis de l'été. Les deux périodes étudiées correspondent à des évolutions légèrement différentes :

- hiver : désaturation notable en baryum compensée en quantité équivalente par l'aluminium les protons et par le calcium ; apparition timide de K^+
- hiver + été : désaturation plus avancée en Ba^{++} compensation intégrale par les cations "biologiques" Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} , Mn^{++} diminution d'aluminium échangeable sans augmentation d' H^+ ; faible fixation d'aluminium "libre".

Evolution en Bh : la capacité d'échange diminue sensiblement au dépens du baryum, surtout pour l'échantillon annuel. La garniture cationique des deux échantillons est très proche. Elle ne diffère que par l'apparition de Na^+ après l'été. L'aluminium "libre" augmente notablement pour l'échantillon annuel.

Comparaison A_1 -Bh : l'évolution en A_1 se traduit par une augmentation du magnésium et une faible réduction de la CEC. En Bh on observe une réduction des teneurs en magnésium et une diminution notable de la CEC liée à la fixation d'Al "libre".

3.4.2.3 - Evolution minéralogique (Fig.17)

Elle confirme l'évolution des capacités d'échange et du taux d'aluminium libre.

Horizon A_1 -

- hiver : faible évolution : pic dominant à 11,16 A petit pic, à 13,68 A
- hiver + été : évolution plus avancée vers un blocage des feuillets : pic à 11,40 proche du pic à 13,83 A

Horizon Bh -

- hiver : blocage partiel des feuillets : pic à 13,68 A (dédoublé à 14,06) dominant sur le pic à 11,40 A
- hiver + été : évolution identique plus avancée

L'étude minéralogique concorde avec les analyses chimiques et souligne l'extrême "sensibilité" de réaction de ces minéraux.

3.4.2.4 - Interprétation

- L'horizon A₁ semble fonctionner différemment suivant la saison :

- * l'évolution hivernale traduit un milieu complexant et/ou très dilué, les cations biologiques (Ca⁺⁺, K⁺, Mn⁺⁺) étant peu présents dans le milieu ;
- * l'évolution estivale traduit un milieu moins complexant et/ou plus confiné et biologiquement plus actif.

- Les minéraux implantés dans l'horizon Bh traduisent quelle que soit la saison une évolution caractéristique d'un milieu peu complexant.

Remarque : Les changements quantitatifs et qualitatifs notables intervenus dans la garniture cationique des vermiculites pendant une très courte durée (juillet à octobre) montrent que cette évolution dépend plus des modifications du milieu, que de la durée du temps d'incubation.

3.4.3 - Synthèse : Fonctionnement géochimique actuel et morphologie du profil

La répartition analytique du fer et de l'aluminium de haut en bas du profil indique :

- une forte amorphisation du fer
- une redistribution possible de l'aluminium, associée à un appauvrissement général du sol en cet élément
- un volume minéral fragmenté résiduel disponible

en A_1 pour l'altération relativement faible.

L'analyse microscopique de l'horizon Bh montre :

- une diffusion de l'aluminium et, en plus faibles teneurs, du fer dans l'ensemble du plasma sans concentrations relatives ou absolues en bordure de vide.
- des concentrations de fer et d'aluminium résiduelles recoupées par la porosité biologique.

L'évolution expérimentale de minéraux tests indique :

- pour l'horizon A_1 , un milieu complexant et biologiquement peu actif l'hiver, et un milieu peu complexant et biologiquement plus actif l'été
- pour l'horizon Bh un milieu peu complexant.

L'étude lysimétrique estivale met en évidence :

- l'accumulation de carbone organique illuvial en Bh ;
- la migration profonde et l'évacuation de l'aluminium et du silicium hors du solum, indépendamment de la dynamique du carbone ;
- l'absence de migration actuelle du fer dans les eaux gravitaires (dans les limites de détection des méthodes utilisées).

Ces approches parallèles concordent dans leurs grandes lignes et permettent de préciser la **dynamique géochimique actuelle de ce sol** :

- des substances organiques à caractère plus complexant l'hiver et peu complexant l'été sont

produites dans l'horizon A_1 , migrent en faible concentration dans les eaux gravitaires, et viennent s'accumuler en Bh ;

- l'aluminium, non ou très faiblement redistribué de haut en bas du profil, est éliminé en grande partie hors du solum, sans faire intervenir de liaison avec la matière organique ;
- la redistribution du fer ne semble pas actuelle; l'accumulation de fer libre en Bh résulte en grande partie de concentrations résiduelles.

Il existe une contradiction apparente dans l'absence de redistribution actuelle nette du fer et de l'aluminium et la présence d'un milieu au moins temporairement complexant en A_1 . En fait, on peut penser que les minéraux test ont surtout réagi à l'extrême dilution des solutions hivernales plutôt qu'avec l'activité complexante des acides organiques, et d'autre part, que le volume de fer minéral fragmenté disponible pour l'altération en A_1 est très faible.

3.4.4 - Cycle biologique

Le sol étudié est couvert par une pelouse à *Carex curvula*, très pauvre en légumineuses. Nous avons mesuré sa productivité aérienne, que l'on peut estimer au tiers de la productivité totale (SPALTENSTEIN, 1984), en fauchant à la hauteur du collet une surface représentative d'1 m². La valeur obtenue est extrêmement faible : 50 g/m². Elle traduit la rudesse des conditions climatiques et trophiques ainsi que l'importance de la superficie occupée en surface par des pierres (10-20 %). Cette "pauvreté" biologique concorde avec les faibles teneurs en calcium et potassium mesurées dans les eaux de drainage (Fig.15).

On doit d'ailleurs noter que, malgré l'abaissement des concentrations en Bh, les exportations de ce sol sont non négligeables surtout si on les compare à la faiblesse de la

fraction minérale fragmentée disponible.

En l'absence de légumineuses, la fourniture d'azote au sol de l'étage alpin se fait essentiellement par voie météorique, lors des orages estivaux (LABROUE, 1981). Ces faibles apports ne sont cependant guère disponibles pour la végétation comme ont pu le montrer BONNEAU (1967-1971) et BOUDOT (1982) sur des sols du même type. En effet, la minéralisation de l'azote comme la nitrification sont très réduites. Ceci explique les teneurs très faibles en azote minéral observées dans les eaux lysimétriques. Inversement, les rapports C/N élevés, mesurés dans ces sols ne sont pas liés à de fortes pertes en azote, mais plutôt à la faiblesse des apports et corrélativement à la faiblesse de la minéralisation du carbone.

Conclusion

Ce sol se caractérise par une grande pauvreté entretenue par des pertes non négligeables dans les eaux de drainage latéral. La faiblesse du cycle biologique semble en être à la fois une cause et une conséquence.

3.5 - ETUDE DE LA BIODEGRADATION

3.5.1 - Respiration du sol

Du fait de l'éloignement de la station, nous n'avons mesuré qu'une fois (quatre répétitions) le dégagement de CO_2 à la surface du sol. La mesure effectuée pendant une période estivale de huit jours, dont quatre jours de pluie, nous a indiqué un dégagement de CO_2 de $193 \text{ mg.h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ comparables aux valeurs obtenues par LABROUE (1976), suivant les mêmes techniques, sur les sols de l'étage alpin du Pic du Midi de Bigorre. Cette valeur qui peut paraître élevée si on la compare à la productivité végétale de la station, est faible vis-à-vis du stock de carbone du sol. Elle reflète l'intense activité microbiologique estivale observée par la

plupart des chercheurs travaillant sur l'étage alpin (GALLAND, 1982 ; LABROUE, 1976 ; SPALTENSTEIN, 1984).

3.5.2 - Evolution comparée de substrats tests lors de la biodegradation

Le tableau 10 indique les périodes d'incubation des substrats. Il traduit bien la dissymétrie climatique de l'étage alpin.

TABLEAU 10
Durée d'incubation des litières

Incubation	hivernale	annuelle	estivale
Dépôt des substrats	1/11/83	1/11/83	28/7/84
Relevé des substrats	27/6/84	11/10/84	11/10/84
Temps passé sous la neige	8 mois	9 mois	1 mois
Temps passé "à l'air"	0	2 mois 1/2	1 mois 1/2

3.5.2.1 - Evolution morphologique

L'évolution morphologique de quelques litières est présentée dans le tableau 11.

Les litières hivernales sont généralement brunes, libres, souples ou rigides, non affectées par la mésofaune, et largement colonisées par des hyphes mycéliens noirs et blancs. Les litières annuelles sont brunes à blanches, libres et peu rigides. La surface disparue est variable, les déjections rares. La surface occupée par des myceliums est élevée, celle décolorée et translucide l'est aussi.

Les caractères principaux de l'évolution morphologique sont donc :

- une faible activité de la faune en surface ;

SUBSTRAT TEST	ERABLE		MYRTILLE		RHODOS Feuilles Vertes		PAPIER Filtre	
	hiver	annuel	hiver	annuel	hiver	été	hiver	annuel
Période d'incubation								
Couleur	brun foncé à beige	brun jaune à blanc	brun à brun clair	brun à blanc	brun à jaunâtre	jaune, rouge à blanc	blanc	blanc
Liaison inter feuilles rigidité	libres rigide	peu liées assez souple	libres assez souple	libres assez rigide	libres rigide	libres rigide	rigide	dilacérés souple
Degré de salissure	nul	très faible	nul	très faible	nul	nul	nul	faible
Surface disparue	nulle	faible	faible	assez élevée	nulle	nulle	très faible	assez élevée
Présence de déjections de la mésofaune	nulle	très faible	très faible	faible	nulle	nulle	nulle	faible
% de surface occupée par un mycélium noirâtre	élevé	élevé	assez élevé	assez élevé	faible localisé	très faible	nul	faible
% de surface occupée par un mycélium blanchâtre	élevé	élevé	assez élevé	élevé	faible	nul	nul	faible
% de surface décolorée et translucide non recouverte par un mycélium	faible	élevé	très faible	élevé	très faible	faible		

Tableau 11 : EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES DIFFERENTS SUBSTRATS TEST
EN FONCTION DE LA DUREE D'INCUBATION

- une activité élevée des champignons sans pour autant que ceux-ci se développent entre les feuilles ;
- une tendance à la décoloration du limbe et à l'"assouplissement".

L'observation au microscope électronique à balayage des litières expérimentales apporte des précisions sur leur évolution morphologique.

- Les litières hivernales et annuelles sont généralement propres. Les déjections observées sont peu nombreuses et organominérales. Les feuilles présentent peu de perforations. Lorsque leur épiderme a disparu, les structures des cellules vidées sont généralement encore visibles. Ces caractères semblent indiquer l'action d'une faune peu abondante, de petite taille, non spécifique de la litière (Planche II, p.193).

- Le blanchiment des feuilles apparaît lié à la disparition des structures cellulaires entre les deux épidermes. Cette disparition peut être totale chez l'érable. Elle est moins prononcée chez la myrtille où des membranes cellulaires sont encore souvent conservées. Il semble par contre, que chez la myrtille, le blanchiment soit associé à la disparition de granules arrondis, accolés aux parois, que l'on peut rapprocher des produits bruns polyphénol protéïques décrits par TOUTAIN (1981) et qui sont observables sur les feuilles brunes (Planche I, p.192).

- Les litières présentent en assez grand nombre des fructifications mélanisées de champignons démâciés (en forme d'oursins) ainsi que des picnides.

- Les hyphes observés en surface pénètrent dans les feuilles par l'ensemble de la surface ; les faces inférieures des feuilles semblent cependant privilégiées sans qu'il ne nous ait été possible de mettre en évidence une

pénétration par les stomates.

- L'aspect dilacéré des feuilles de papier filtre est lié à un déroulement des torsades de fibres de cellulose, sans qu'il ne nous ait été possible de mettre en évidence une présence fongique ou bactérienne particulière (effet du gel ?).

TABLEAU 12

Pertes de poids (%) des substrats tests
(n) = nombre de sachets relevés
(l'écart aux extrêmes est inférieur à 10 %
sauf pour les filtres annuels (50 %)

	hiver	été	année
Litières fraîches Erable	34 (3)	28 (2)	52 (7)
Litières fraîches Carex	34 (3)		58 (5) *
Litières fraîches Myrtille	25 (3)		30 (1)
Litière âgée rhododendron			18,4 (9)
Feuilles vertes rhododendron	21 (6)	14,5 (2)	25,7 (2)
Buchettes Aulne vert		14,6 (3)	19 (5)
Papier filtre cellulose	7 (3)		39 (7)

* Litières relevées en juin 1985

3. 5.2.2 - Evolution pondérale (Tableau 12)

Cette évolution se traduit par une hiérarchie entre les différents substrats : Erable > Carex > Myrtille > Rhododendron, qui s'accroît avec le temps. Cette observation confirme le rôle prédominant de la nature des litières sur la vitesse de biodégradation, mais aussi l'affirmation suivant laquelle le pédoclimat alpin favoriserait la biodégradation des substrats labiles, mais serait incapable d'assurer celle des substrats les plus résistants (LABROUE, 1976). Cette hiérarchie n'est pas en relation directe avec l'activité de la faune : la litière d'érable annuelle, dont la surface disparue est faible, a perdu plus de poids que la

myrtille annuelle, dont la surface disparue est assez élevée. Par contre, la surface occupée par des myceliums est plus importante chez l'érable que chez la myrtille.

La litière de graminées, pourtant déposée dans des proportions très supérieures à celles produites dans la station elle-même ($10 \text{ g}/400 \text{ cm}^2 = 250 \text{ g}/\text{m}^2$ pour $50 \text{ g}/\text{m}^2$ de productivité aérienne de la station) a subi une biodégradation des plus actives.

Enfin, les fortes pertes de poids des litières incubées pendant les deux mois et demi d'été (dont un mois sous la neige) témoignent de l'intensité de la biodégradation estivale. Par contre, la perte de poids des litières de myrtilles, qui représentent une part faible, mais non négligeable, des restitutions dans la station, est plus faible et semble se stabiliser rapidement.

3.5.3 - Mise en évidence de la faune du sol

L'extraction de la faune du sol, par la méthode des entonnoirs de Berlese, réalisée sur des prélèvements de la fin juillet 1985, nous a fourni une faune très peu abondante constituée d'enchytréïdes (biomasse dominante) de collemboles et de larves d'insectes. Ceci confirme le faible rôle de la mésofaune dans la biodégradation de la matière organique, déjà noté à propos de l'évolution des litières. Nous n'avons pas cependant pu déterminer les organismes à l'origine des déjections (?) organominérales observées sur les litières. La présence d'une faune diversifiée et abondante dans les sols de l'étage alpin (KUBIENA, 1953 ; CABIDOCHÉ, 1979 ; MATTHEY *et al.*, 1981) ne semble donc pas généralisée à tous les sols de cet étage.

3.5.2.4 - Conclusion à l'étude de la biodégradation

L'activité des organismes responsables de la biodégra-

dation est fonction du pédoclimat du sol.

La période enneigée se traduit par des pertes de poids notable des litières que l'on peut associer à leur envahissement par les hyphes mycéliens. L'activité mésobiologique en surface est très faible.

La période déneigée se traduit par une biodégradation intense des litières et de la matière organique du sol, et par une tendance au "blanchiment" des litières que l'on peut attribuer à la destruction des structures cellulaires, ou des pigments bruns accolés aux membranes cellulaires des litières.

Cette étude demeure cependant très partielle, dans la mesure où la plus grande partie de la matière organique produite dans cette station est restituée au sol par les racines de graminées, réputées coriaces (LABROUE, 1976). Les faibles teneurs en carbone enregistrées dans les eaux gravitaires suggèrent, en particulier, qu'une forte proportion du carbone accumulé en Bh n'est pas d'origine illuviale, mais provient de la décomposition d'anciennes racines.

CONCLUSION A L'ETUDE DE LA STATION DE NIVOSE

Les sols de la station de Nivose sont des rankers humifères développés dans un matériau gneissique peu fragmenté, de faible épaisseur, reposant sur une dalle rocheuse en pente moyenne. Ils portent une pelouse à *Carex curvula* de faible productivité. L'essentiel du volume du sol est occupé par des éléments grossiers et par de la matière organique. L'horizon Bh présente, par rapport à l'horizon A₁, des teneurs pondérales plus élevées en fer et aluminium libre correspondant à des teneurs légèrement plus élevées en ces éléments (Al) dans le plasma de cet horizon et à des concentrations relictuelles (Fe) sans relation avec la porosité actuelle.

Le pédoclimat alpin est particulièrement contrasté : la période enneigée, d'environ neuf mois, pendant laquelle le sol draine des quantités considérables d'eau de fonte, est suivie d'une courte période déneigée pendant laquelle la partie supérieure du sol subit de fortes variations de température et de teneurs en eau. La présence d'une dalle rocheuse favorise par ailleurs, à son contact, un fort drainage latéral.

La pelouse qui s'enracine densément dans ces sols restitue chaque année en surface, une faible quantité de résidus végétaux. Ceux-ci disparaissent rapidement comme en témoigne l'absence d'accumulation d'humus brut. L'étude de la biodégradation de substrats tests montre que ces débris sont pour une faible proportion, fragmentés et incorporés à la matière minérale par la mésofaune. Leur dégradation met surtout en jeu une microflore, particulièrement active durant l'été, responsable d'un "blanchiment" de certaines litières, et que l'on a pu associer à la disparition des membranes cellulaires ou des granules arrondis qui leur sont

accollés. Ces granules sont semblables à ceux décrits par TOUTAIN (1981) comme des pigments bruns polyphénols -protéiques et dont la disparition caractériserait les humus actifs (mull), alors qu'ils s'accumuleraient dans les humus brut.

La forte minéralisation estivale mesurée dans cette station semble cependant surtout s'exercer aux dépens des substrats les plus labiles (Carex). Les substrats plus résistants, comme les feuilles de myrtille, qui représentent une part non négligeable de la productivité de la station, se dégradent plus lentement. On peut penser qu'il en est de même pour les racines de graminées, réputées résistantes à la biodégradation. Le rapport C/N élevé de ce sol, en l'absence d'azote dans les eaux de drainage, résulte en partie de la faiblesse des apports externes d'azote, mais confirme surtout l'insuffisance de la minéralisation annuelle du carbone.

L'évolution de la matière organique du sol se traduit par la production dans l'horizon A₁ de composés organiques dont les propriétés complexantes sont plus accentuées l'hiver que l'été.

La redistribution de matière organique, en faible concentration, de l'horizon A₁ vers l'horizon Bh où elle s'accumule, n'est cependant pas associée à une redistribution de fer (inexistante) ni (ou de manière marginale) d'aluminium ; ce dernier élément étant, en majeure partie, exporté latéralement dans les eaux de drainage. Ce fonctionnement géochimique s'accorde avec la microanalyse du sol qui suggérerait qu'une part importante de l'accumulation de fer et d'aluminium en Bh était relictuelle.

Par ailleurs, les basses teneurs en éléments minéraux dans les eaux de percolation s'accordent avec la faible productivité biologique de la station. Le sol exporte cependant des quantités notables de potassium, calcium, aluminium et silicium, du fait de l'importance des volumes

drainés.

Cette "pauvreté géochimique" du sol doit être mise en relation d'une part, avec la faiblesse du volume minéral fragmenté disponible pour l'altération, et d'autre part, avec une "agressivité" modérée des horizons A_1 .

Le terme de "cryptopodzolique" généralement attribué à ces sols au vu de leur morphologie et de la répartition verticale du fer et de l'aluminium libre doit donc être fortement nuancé, car il ne correspond que très partiellement avec le fonctionnement géochimique actuel.

4. BALME : SOL "PODZOLIQUE" SUR CALCSCHISTES SOUS PELOUSE ALPINE

4.1 - PRESENTATION DE LA STATION

La zone étudiée se trouve sous les Têtes de Balme à proximité du Col de Balme qui sépare au Nord-Est, la vallée de Chamonix de la vallée de Trient. Les calcschistes sédimentaires du Lias affleurent là sur une vaste surface inclinée vers le sud. Située sur une pente moyenne, à une altitude de 2200 m, la station étudiée est formée de sols podzoliques développés sur une altérite de schistes liasiques de pendage général parallèle à la pente.

La végétation est une pelouse à Nard intermédiaire entre les étages subalpins et alpins.

Végétation de la station :	<i>Carex sempervirens</i>	3
	<i>Nardus stricta</i>	2
	<i>Trifolium alpinum</i>	3
	<i>Ligusticum mutellina</i>	2
	<i>Poa alpina</i>	2
	<i>Luzula lutea</i>	1
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	1
	<i>Luzula spadicea</i>	+
	<i>Geum montanum</i>	+
	<i>Gentiana purpurea</i>	+

En amont, près du sommet des Têtes de Balme, la pente se raidit : la surface du sol présente alors des bourrelets en forme de croissant allongés perpendiculairement à la pente, caractéristiques des phénomènes de gélifluxion (DAMBRINE, 1981). On observe là, sous une pelouse à canche flexueuse, des sols ocres podzoliques remaniés et superposés.

Le sommet des Têtes de Balme, généralement déneigé par le vent pendant l'hiver, porte, sous une végétation de "crête ventée", des sols ocres podzoliques humifères. Quelques creux abrités, dans lesquels se forment des congères sont occupés par des stagnogleys.

En aval de la station, la pente s'accroît à nouveau. Elle est entaillée par de nombreux ravissements qui prennent souvent naissance dans des loupes de solifluxion. Les schistes portent alors, sous une lande à genévrier, des sols ocres podzoliques.

L'ensemble de la pente, qui constitue l'extrémité supérieure de l'alpage de Balme, n'est plus pâturé actuellement que par une dizaine de vaches en fin d'été. Par contre, les marmottes et surtout les campagnols retournent périodiquement les horizons supérieurs des sols.

La répartition des sols sur ce haut de versant nous semble résulter des interactions entre deux facteurs : le microclimat et la stabilité : les sols podzoliques de la station étudiée ne se localisent qu'en pente moyenne et ils correspondent à un enneigement d'assez longue durée.

Cette station ne s'intègre pas directement dans la séquence altitudinale étudiée sur roches cristallines. Nous l'avons cependant choisie pour son intérêt pédogénétique et agronomique (c'est le seul alpage de la vallée de Chamonix) et du fait de travaux antérieurs menés dans le Beaufortain sur le même type de roche-mère (DAMBRINE, 1981, van OORT, 1983).

4.2 - DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DU SOL DE REFERENCE

4.2.1 - Description du sol

3 cm	A ₀	mat racinaire dense enserrant des micro-agrégats noirs arrondis
3-8 cm	A ₁	brun foncé à noir, très organique, limoneux, structure micro-agrégée fine peu ferme, très nombreuses racines, nombreux bulbes de crocus accumulés dans des terriers de campagnols, transition diffuse
8-15 cm	A ₂	gris clair rosé, humide (gris rosé 7,5 YR 6/2 à sec) limoneux, structure polyédrique subanguleuse à micro-agrégée peu nette, nombreux petits fragments de schiste altérés de couleur brune ou ocre peu résistants, assez nombreuses racines sans gainages racinaire durables : ils sont visibles à la fonte des neiges et disparaissent ensuite, transition diffuse rapide
15-50 cm	Bs	brun ocre à ocre jaune, humide (brun coloré 7,5 YR 5/6 à sec) limoneux, structure micro-agrégée très nette, nombreux fragments de schiste de taille variée, altérés bruns et ocres, très nombreuses racines fines, transition diffuse
50-120	BC	brun jaune, humide (jaune brunâtre 10 YR 6/6 à sec) très nombreux fragments altérés de schistes entassés suivant une direction grossièrement parallèle à la pente, les faces des fragments sont grises, l'intérieur est brun et poreux, la terre fine, assez abondante entre les éléments grossiers au sommet de l'horizon, diminue rapidement pour ne plus occuper avec les graviers que les faces supérieures des éléments grossiers (coiffes), sous lesquels on observe des vides d'entassement. Nous n'avons pas pu observer la roche saine.

Cette morphologie varie légèrement suivant la position des sols dans la station : sur les zones en relief, la partie supérieure de l'horizon Bs est plus brune, elle est plus ocre dans les creux.

Ces sols montrent donc certains caractères morphologiques de podzols.

4.2.2 - Organisation et micro-analyse en place de quelques constituants

Des lames minces, imprégnées à sec, des horizons A₁, A₂ et Bs du sol ont été décrites (Fig.18) en nous limitant aux caractères qui nous ont semblé les plus en rapport avec le fonctionnement actuel. Parallèlement, nous avons analysé la composition chimique de quelques constituants (Fig.19).

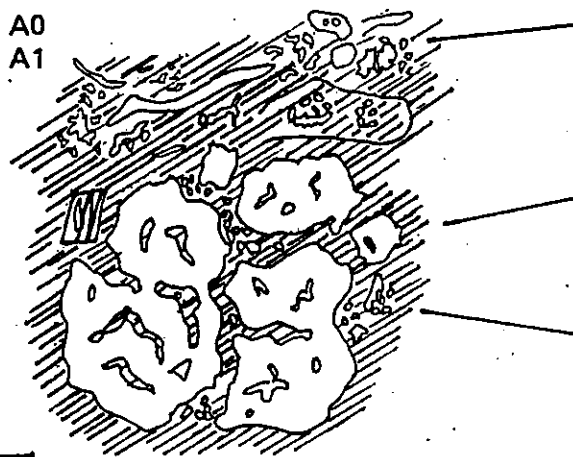
L'évolution relative, suivant les horizons, de certains caractères observés est présentée sur le tableau 13.

Interprétation

- Le sol s'est développé à partir d'une isaltérite schisteuse de couleur brune essentiellement constituée de quartz et micas et présentant de nombreux vides de dissolution (calcite ?). Sa couleur brune lui est donnée par de très nombreuses plages noires à brun rougeâtre, opaques, de forme variable : concentrées et anguleuses, ou allongées parallèlement à la schistosité, ou enfin couvrant une grande partie des fragments d'altérite. A l'analyse ces plages indiquent une teneur élevée en fer et manganèse et/ou en matière organique (Fig.19). La présence de traces de soufre dans certaines concentrations anguleuses de couleur rouge indique par ailleurs une origine vraisemblablement pyriteuse

- La fragmentation et l'altération des lithoreliques fournissent au fond matriciel un squelette quartzeux et micacé, et réalisent des concentrations de fer et de manga-

Fig. 18 : Organisation, à l'échelle microscopique,
des horizons du sol de BALME



microagrégats isolés (70 μ) et agrégats anguleux (500 μ) constitués de microagrégats arrondis organiques et de débris végétaux

agrégats organominéraux plus ou moins denses, séparés par des chenaux biologiques (racinaires) très abondants

microagrégats organominéraux, libres ou jointifs, plasma brun clair sépi- que abondant

4mm



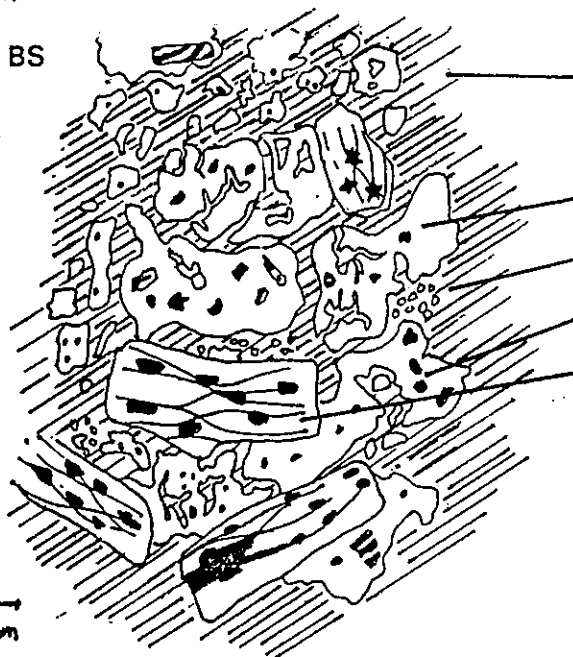
plasma clair sépi- que, assez nombreux glébules noirs à limite tranchée la plupart présentent une structure biologique (racine) ou sont holorga- niques

nombreux pores biologiques peu connec- tés, orientations plasmiques autour des racines

porosité fissurale fine abondante

nombreuses lithoreliques brunes de schiste disséminées

2mm



agrégats arrondis de taille variable (50 à 1000 μ) séparés par de nombreux chenaux

plasma ocre sépi- que homogène squelette abondant

microagrégats (70 μ) ocres, dans la porosité

très nombreux glébules noirs isotiques riches en fer et en manganèse

très nombreux lithoreliques de schis- te brunes présentant des vides de dis- solution (calcite ?) et de très nom- breuses plages bruns à rougeâtres iso- tiques riches en fer et manganèse et/ou en matière organique

1mm

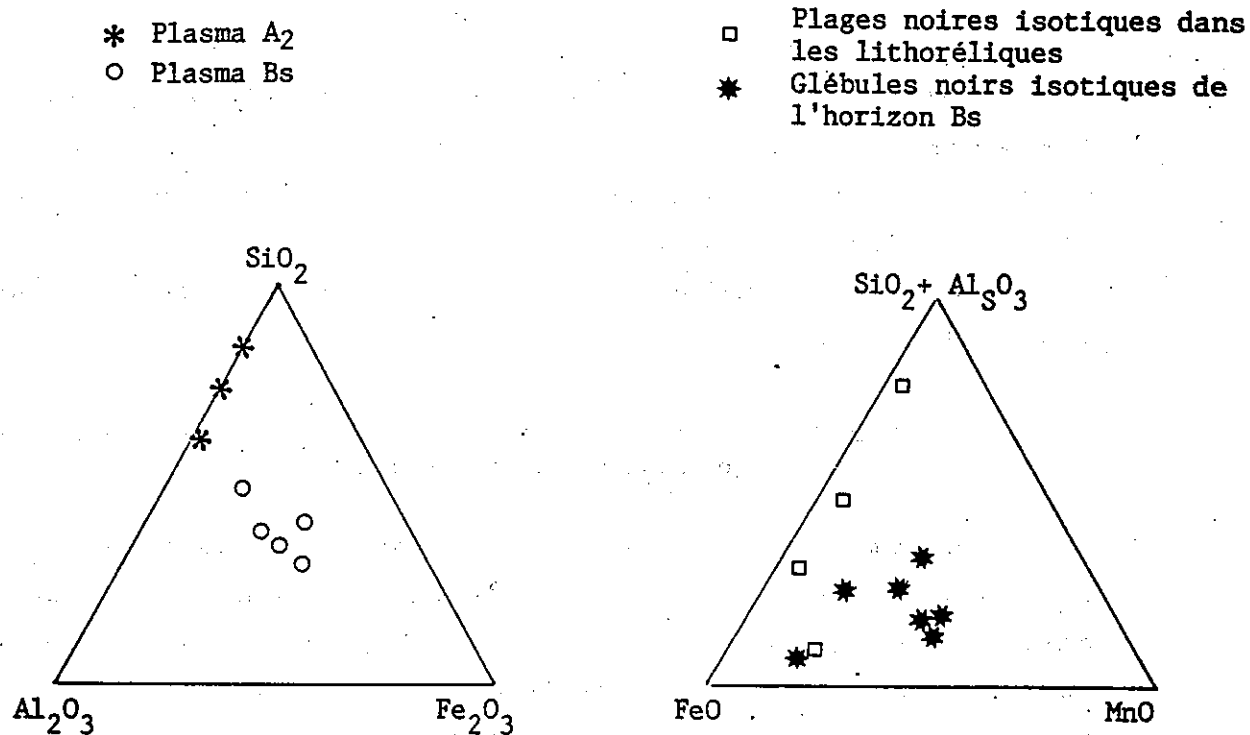


Fig. 19 COMPOSITION CHIMIQUE RELATIVE
DE QUELQUES CONSTITUANTS

Horizons	Teneur en fer et aluminium du plasma	Présence de glébules noirs isotiques riches en Fe et Mn	Présence de lithoréliques	Porosité	Présence de microagréats dans la porosité
A ₁	faible	très faible	très faible	très élevée biologique	très forte
A ₂	faible	très faible	élevée	assez élevée fissurale et biologique peu conductrice	forte
B ₃	élevée	très élevée	très élevée	très forte biologique	très forte

Tableau 13 : EVOLUTION RELATIVE SUIVANT
LES HORIZONS DE QUELQUES CARACTERES

nèse de forme généralement anguleuse et à limite tranchée. On observe ainsi, disséminés dans le plasma de l'horizon Bs, de très nombreux glébules noirâtres anguleux ou arrondis, et enrichis en manganèse par rapport aux plages noires présentes dans les lithoreliques. Ces glébules disparaissent au sommet du profil.

- La concentration relative en fer et Al du plasma de l'horizon Bs est nettement plus élevée que celle des plasmas des horizons A₁ et A₂.

- La micro-analyse ne permet pas de détecter de concentrations de fer autour des racines.

4.2.3 - Données analytiques

4.2.3.1 - Caractères généraux (Fig.20)

Ce sol présente en surface un taux élevé de matière organique à faible C/N (13) qui peut être associé à la présence d'une végétation prairiale à forte composante légumineuse (contrairement à Nivose). Le rapport C/N diminue faiblement en profondeur et demeure constant, comme le taux de matière organique, entre les horizons A₂ et Bs.

L'évolution de la taille des particules est caractéristique d'une intense fragmentation (LEGROS, 1982). Cet éclatement des particules grossières, qui fournit en surface une fraction dominante de limons fins, a déjà été observée et décrite sur le même type de matériau dans le Beaufortain (van OORT, 1983).

La capacité d'échange, peu élevée est fonction de la faible réactivité de surface des particules argileuses. Le taux de saturation en bases est très faible au sommet du profil et nul en profondeur. Le pH, très acide en surface, augmente nettement avec la profondeur.

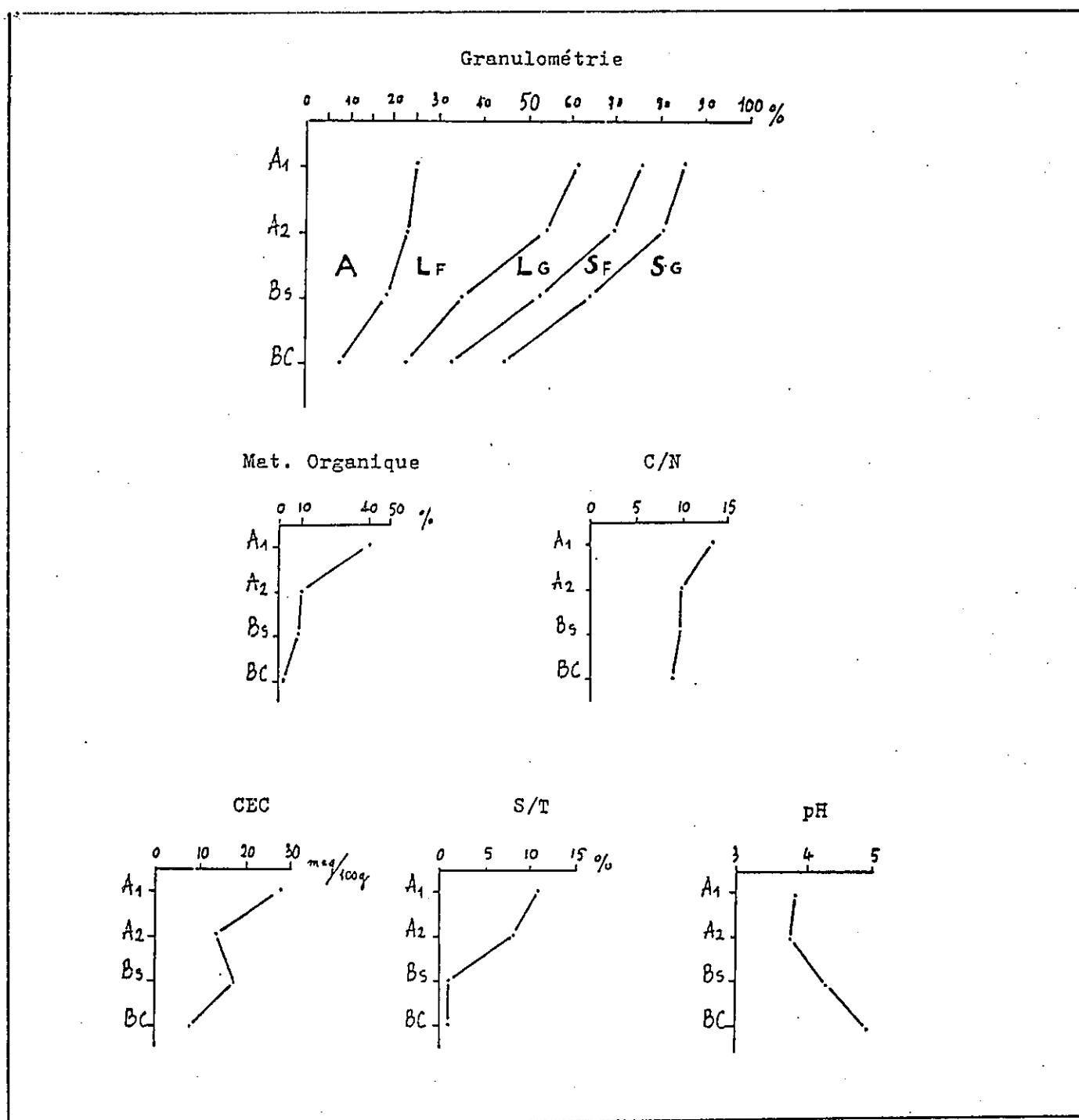


Fig. 20 Caractères analytiques généraux

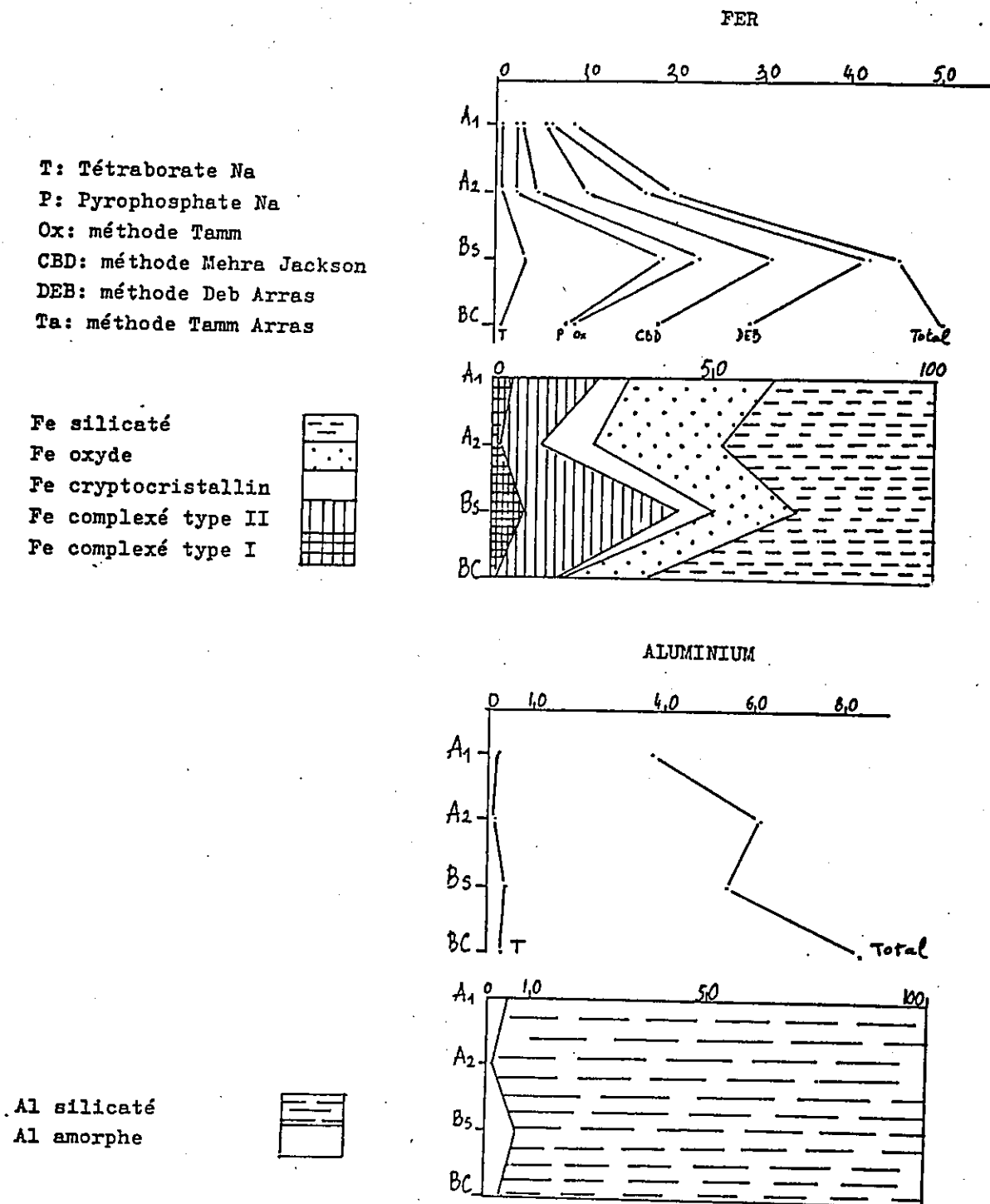


Figure 21 : Evolution des formes du fer et de l'aluminium

4.2.3.2 - Evolution des formes du fer et de l'aluminium (Fig.21)

L'ensemble du sol, si l'on se fixe comme référence l'horizon Bc est appauvri en fer et en aluminium. Cependant, les profils analytiques des formes du fer et de l'aluminium en valeur absolue et relative correspondent à ceux d'un podzol : Maximas de fer et d'aluminium amorphes organiques en valeur absolue et relative en Bs, forte augmentation en valeur relative du "fer silicaté" et du fer oxyde par concentration relative en A₂. Les teneurs en fer et aluminium amorphe organique demeurent importantes en BC, ce qui témoigne d'une migration profonde de ces deux éléments.

Vérifié par une double analyse, l'appauvrissement relatif en aluminium total de l'horizon Bs par rapport à l'horizon A₂, exprime soit un appauvrissement réel des horizons Bs en aluminium silicaté, soit une fourniture plus importante en A₂, de silicates frais, par fragmentation.

4.2.4 - Interprétation

Ce sol s'est développé à partir d'une isaltérite à structure schisteuse essentiellement constituée de quartz et micas et présentant de nombreuses concentrations de fer, manganèse et matière organique.

La pédogénèse se traduit par :

- Une intense fragmentation, affectant les lithoreliques, et qui fournit en surface une fraction fine (limons fins + argile), quartzeuse et micacée pouvant représenter jusqu'à 60 % de la fraction minérale. Cette fragmentation libère dans le plasma les concentrations de fer et de manganèse présentes dans les lithoreliques.

- Une redistribution de fer et d'aluminium des horizons

A_1 et A_2 vers les horizons Bs ou les produits imprègnent le plasma de manière homogène. Parallèlement on observe une réduction notable en haut du profil de la présence des concentrations ferromanganiques issues des lithoreliques.

- Un appauvrissement en fer et aluminium total de l'ensemble du sol par rapport à l'horizon BC. L'horizon Bs en particulier est faiblement appauvri en fer et fortement appauvri en aluminium par rapport à l'horizon BC.

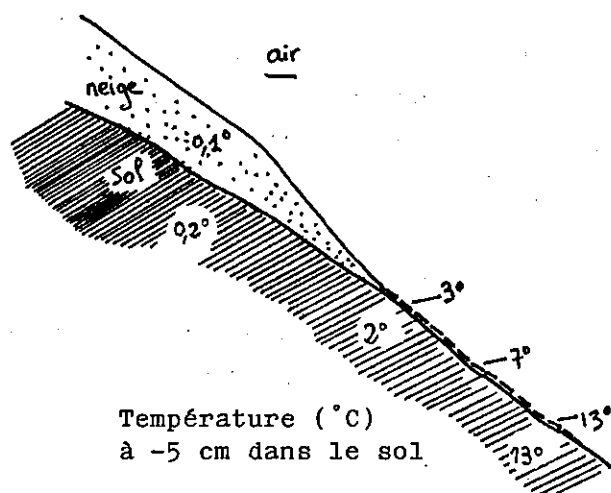
- Une structuration en agrégats nets délimités par une forte porosité, des horizons A_1 et Bs que l'on peut associer en particulier à l'abondance des racines et à l'action de la faune. Par contre, la porosité de l'horizon A_2 est moins abondante, plus fine et peu conductrice. Cette discontinuité dans la porosité ne se traduit cependant pas par des gainages racinaires durables.

4.3 - PEDOCLIMAT

4.3.1 - Régime thermique

Nous n'avons pas effectué d'enregistrements de température dans cette station. L'absence de couvert végétal dense associée à une exposition Sud et à une altitude élevée, nous permet de penser que le pédoclimat estival est extrêmement contrasté entre la nuit et le jour. C'est ainsi la raison invoquée par RICHARD (1975) pour expliquer la "descente" de pelouses alpines à relativement basse altitude sur ce site.

Une particularité de cette station a cependant été relevée à la fonte des neiges : l'eau de fonte ruisselle sur le sol sous forme d'un film d'eau fin qui s'échauffe rapidement sous le soleil. Elle contribue par ce biais à échauffer le sol sur quelques mètres en aval.



Températures dans la neige et dans le film d'eau de fonte.

4.3.2 - Régime hydrique

Nous ne disposons pas de données pluviométriques sur cette station. En se basant sur son altitude, on peut l'estimer entre 2000 et 2500 mm d'eau dont environ les 3/4 sous forme de neige. La durée d'enneigement, observée pendant notre séjour, varie entre 7 et 8 mois. Cependant, l'intégralité de la nivopluviométrie n'est pas transmise au sol de cette station et ceci pour deux raisons :

- L'exposition, plein Sud, et l'altitude élevée imposent des variations de température importantes et brutales. Celles-ci déterminent la formation lors de la fonte de la neige, d'épaisses (20 cm) croûtes de glace de regel au contact du sol. L'eau de fonte des neiges, percolant à travers le manteau neigeux, s'écoule latéralement au contact des croûtes glacées et n'atteint le sol qu'en certains points. Ceci explique les teneurs en eau relativement faibles mesurées (Fig.22) sous la neige. (Ces phénomènes de regel affectant aussi les autres stations, mais dans une bien moindre mesure).

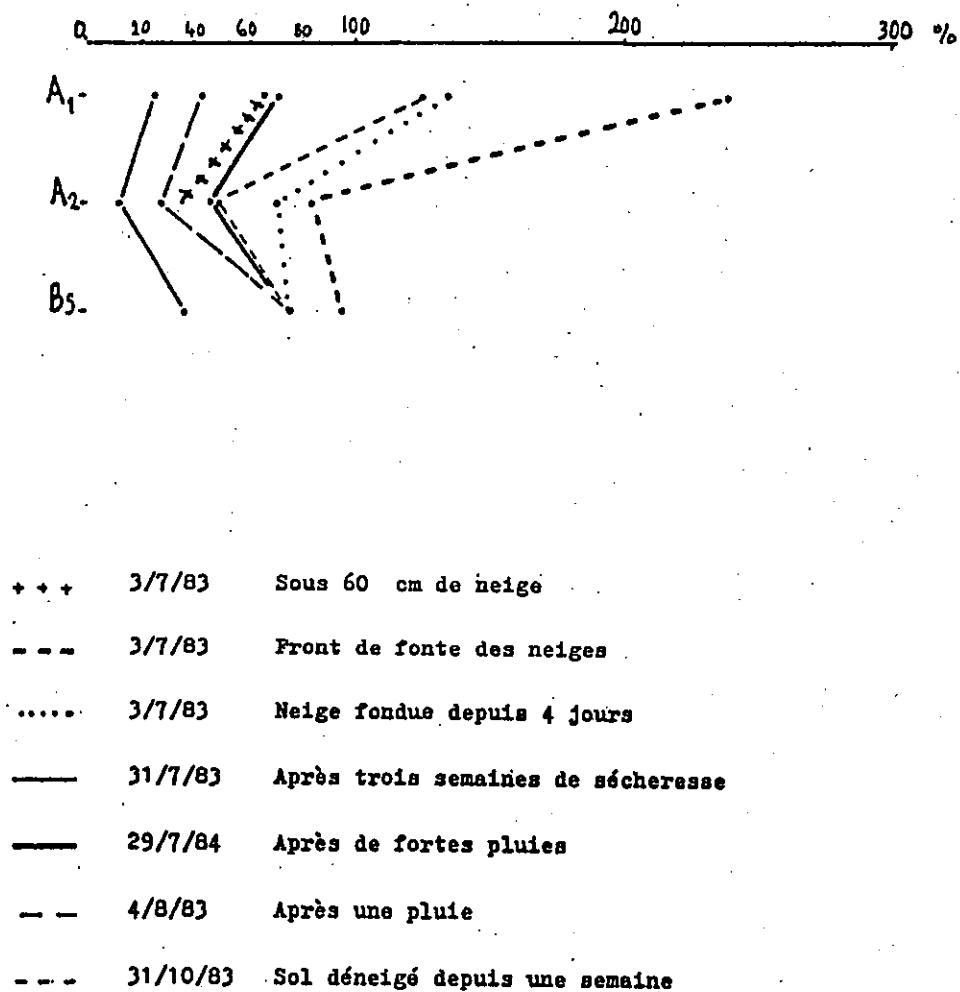


Figure 22 : Présentation de quelques profils hydriques
Caractéristiques du sol de Balme

- Lors de la fonte, à l'extrémité des nevés, l'eau ruisselle intensément sur le sol gorgé d'eau. De ce fait, les creux collectent une fraction importante des eaux de fonte provenant de la neige située sur les bosses. Cette faible conductivité hydrique en surface des sols situés sous pelouse a déjà été décrite et analysée (DUCHAUFOR, 1952 van OORT, 1984).

Pour ces raisons, il est relativement difficile d'établir un bilan hydrique dans ce type de station.

L'évolution des teneurs en eau en fonction de la profondeur montre une variabilité assez importante jusqu'en Bs, conséquence de l'exposition Sud, de l'absence de couvert végétal dense et de la prospection intense du sol par les racines de graminées.

4.3.3 - Interprétation

Deux grandes périodes de pédoclimat opposé se succèdent

- La période enneigée : les sols à basse température, saturés en eau drainent des quantités assez variables d'eau de fonte suivant leur position topographique.
- La période déneigée : l'exposition Sud, l'altitude élevée et l'absence de couvert végétal dense sont à l'origine de variations brutales de température et d'humidité.

4.4 - ETUDE DU FONCTIONNEMENT BIOGEOCHIMIQUE

4.4.1 - Etude lysimétrique

4.4.1.1 - Origine et domaine de validité des données

Six lysimètres identiques (L = 60) cm ont été implantés au printemps 1983 à partir de trois tranchées décalées sur

la pente d'une dizaine de mètres. Les gouttières ont été enfoncées deux par deux, à partir de chaque tranchée, dans chacun des horizons principaux du sol (deux en A_1/A_2 , deux en Bs, deux en BC).

La station étant assez éloignée, nous ne l'avons visitée qu'à la fin des périodes pluvieuses, ce qui explique le petit nombre de données présentées. Par ailleurs, L'enneigement considérable nous a fourni des volumes d'eau de fonte très supérieures aux capacités des récipients installés. Les valeurs des concentrations pendant l'hiver ne concernent donc que la première fraction des eaux de fonte, le restant s'étant écoulé par un trop plein prévu à cet effet.

Enfin, les volumes d'eau drainés durant l'année en A_1/A_2 et en Bc sont nettement supérieurs à ceux drainés en Bs. Ceci résulte d'une part des caractéristiques porales des différents horizons et d'autre part, du dispositif utilisé :

- La bordure des lysimètres enfoncés en A_2 affleure dans l'horizon A_1 dont nous avons pu observer la forte porosité. Nous avons de ce fait, vraisemblablement augmenté le drainage réel à travers l'horizon A_2 .

- Les faibles volumes obtenus en Bs traduisent la faiblesse de la porosité de l'horizon A_2 susjacent.

- Enfin, les volumes importants obtenus en BC pourraient résulter de la disposition en plans superposés, parallèles à la pente, des reliques de schiste. De plus, ces gouttières étant implantées relativement profondément (60 cm), un léger effet de rabattement de nappe est possible.

Pour alléger la présentation, seules les données de trois lysimètres (un par horizon) sont présentées ici. Les autres se trouvent sous la même forme en annexe. Les concentrations moyennes calculées sur les périodes pendant les-

Tableau 14 : Valeurs moyennes des concentrations
calculées à partir des dates où tous
les lysimètres ont fonctionné
(20/6, 29/7, 30/8, 12/9, 14/10)

stat	gout	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	NO3	NH4	C
Balme	A2_1	1.436	0.418	1.167	0.644	0.447	0.103	0.084	0.065	2.031	0.699	4.527
Balme	A2_2	1.146	0.367	0.874	0.392	0.323	0.120	0.065	0.092	1.763	0.556	4.641
Balme	Bs_1	1.483	0.400	0.419	0.535	0.831	0.000	0.053	0.082	2.553	0.018	2.655
Balme	Bs_2	1.500	0.420	0.385	0.475	0.985	0.008	0.096	0.105	2.811	0.296	3.943
Balme	BC_1	0.683	0.167	0.112	0.544	0.531	0.000	0.001	0.054	1.334	0.005	2.364
Balme	BC_2	1.133	0.290	0.163	0.648	0.867	0.020	0.026	0.080	2.234	0.002	2.196

quelles tous les lysimètres ont fourni un volume d'eau sont indiquées dans le tableau 14. Le commentaire et les conclusions tiennent cependant compte de l'ensemble des résultats obtenus dans cette station.

4.4.1.2 - Analyse des fluctuations saisonnières des concentrations en solution en fonction de la profondeur
(Fig.22 bis)

L'évolution comparée des volumes drainés et des dates de prélèvement traduit le pédoclimat de la station : fonte lente de la neige pendant l'hiver, fonte très rapide à la fin du printemps suivie d'une période de sécheresse relative marquée par la faiblesse des volumes drainés. L'augmentation de la pluviométrie associée à une évaporation plus faible en début d'automne est à l'origine des forts volumes récupérés alors. La période qui précède la neige est à nouveau plus sèche.

- Horizon A₁/A₂ -

Cations métalliques - Calcium et potassium sont dominants et subissent d'importantes fluctuations avec des maximums d'été et des minimums lors de la fonte rapide des neiges (2/7) et en début d'automne (14/10).

- Sodium et magnésium sont peu abondants et relativement stables.
- Les fortes fluctuations de l'aluminium sont approximativement parallèles à celles du calcium et sont faiblement corrélées avec le nitrate. On n'observe pas de corrélation évidente entre les teneurs en aluminium et celles en carbone ou avec le pH.
- Le fer, le silicium et le manganèse sont présents en faibles concentrations et fluctuent peu.

carbone et Azote - Les teneurs en nitrate dépassent toujours celles en ammoniacale. Elles sont maximales en été, mais leur valeur hivernale n'est pas négligeable. Les teneurs en carbone sont plus élevées et subissent des fluctuations grossièrement parallèles à celles du nitrate, excepté en automne où elles augmentent fortement

pH - Le pH intègre les effets de la dilution (maximum lors de la fonte rapide, minimum dans les faibles volumes) et de l'activité biologique (pH minimum pour les maximums en nitrate l'été, ou en carbone à l'automne).

- Horizon Bs -

Cations métalliques - Par comparaison avec l'horizon A₂, les teneurs moyennes en Ca, Na et Mg sont sensiblement identiques. Par contre, on observe une forte diminution du potassium attribuable en partie, au moins en ce qui concerne la période estivale, à l'absorption par les racines.

- La teneur en aluminium augmente fortement parallèlement à la teneur en calcium et en nitrate. Les fluctuations de ces éléments sont nettement corrélées.

- Le fer n'est plus dosable sauf, à très faibles concentrations lors de très fortes précipitations (fonte rapide et 14/10), il est alors corrélé avec le carbone.

- Les teneurs en silicium et manganèse sont très faibles et stables.

Carbone et Azote - Les teneurs moyennes en carbone diminuent légèrement, le maximum apparaissant, contrairement à ce que l'on a pu observer dans l'horizon A₂, à la fonte rapide des neiges.

- Les concentrations moyennes en nitrate sont plus élevées qu'en A₂, l'ammoniacale n'est plus présent qu'en quantité très faible.

A1/A2

BS

B/C

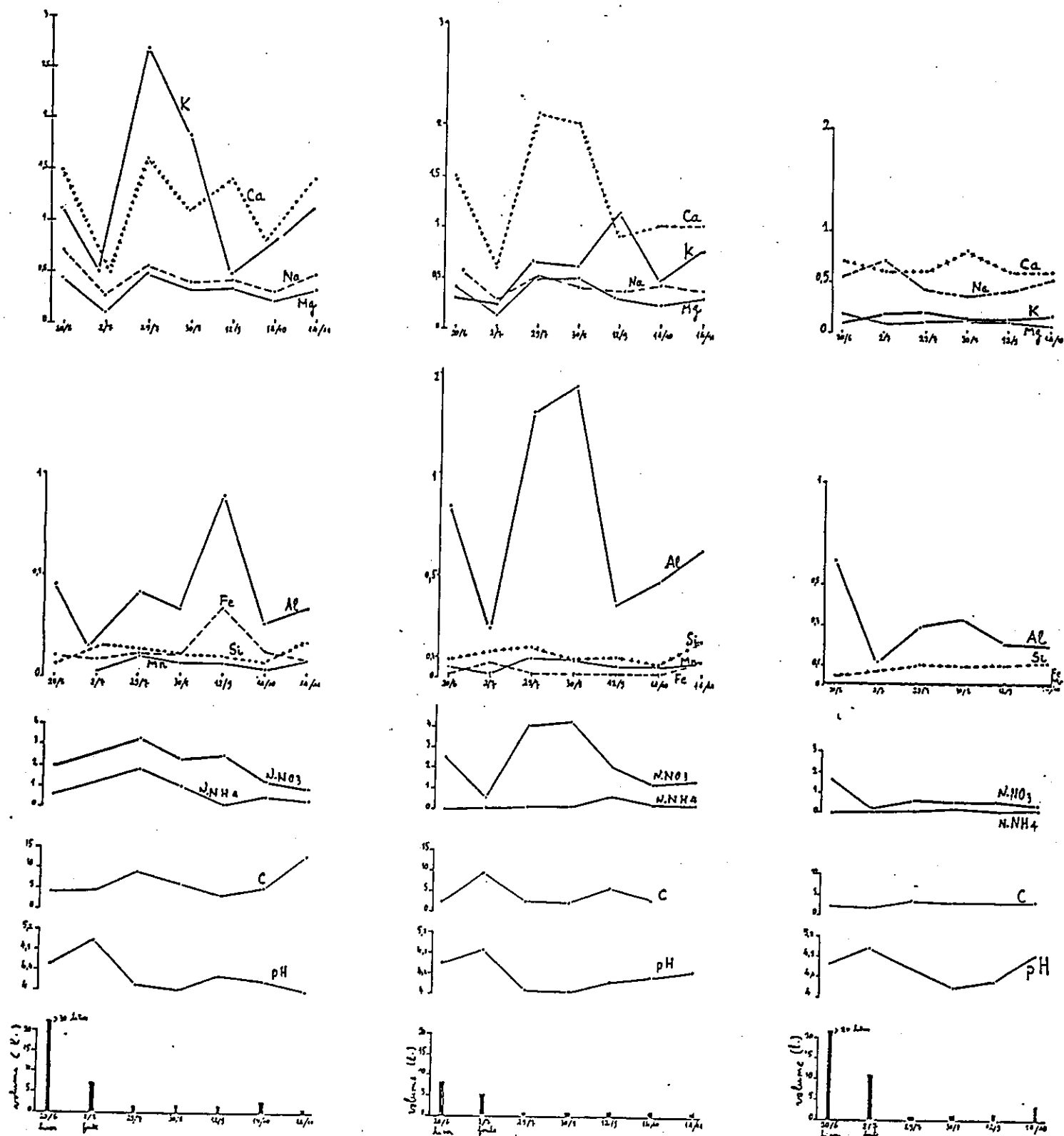


Fig. 22 bis : Fluctuations saisonnières des volumes drainés (litres), du pH et des concentrations (ppm) des eaux gravitaires
Balme, lysimètres A₁/A₂(1) Bs(1) BC(1)

pH

- Son évolution est semblable à celle observée en A₂, l'absence de données en fin d'année ne nous permet pas d'observer s'il remonte, comme en A₂, à cette période.

- Horizon BC -

Cations métalliques - On observe, par rapport à l'horizon Bs, une forte réduction des teneurs en calcium, potassium et magnésium et une réduction de l'amplitude de leurs fluctuations. Le calcium reste cependant le cation dominant.

- Par contre, les concentrations en sodium restent globalement stables.
- Les teneurs en aluminium diminuent fortement ; l'allure générale des fluctuations est la même qu'en Bs, mais le maximum se trouve décalé en hiver, de même que le maximum en nitrate. Cette évolution peut être interprétée par un lessivage de nitrates produits à l'automne et pendant l'hiver, et non utilisés à cette période par la végétation.
- Les teneurs en silicium sont stables, par contre, le fer et le manganèse ne sont plus dosables.

Carbone et Azote

- Les teneurs en carbone et en nitrate sont très faibles excepté pour ce dernier en hiver.

pH

- L'évolution est similaire à celle observée dans les horizons supérieurs et traduit essentiellement la dilution ; la valeur moyenne étant légèrement plus élevée qu'en Bs.

4.4.1.3 - Synthèse

Le comportement des éléments en solution, en fonction de la profondeur permet de les séparer en différents groupes

- Le potassium diminue avec la profondeur. Ses fluctuations sont liées à l'activité biologique sans être précisément corrélées avec les teneurs en nitrate ou en carbone. Elles sont la conséquence complexe des

hydrolyses et du recyclage biologique. Le magnésium et le manganèse montrent dans des proportions bien moindre, un comportement similaire.

- Le fer présent en faibles concentrations en A₁ disparaît dès l'horizon Bs, sauf à l'occasion de très fortes précipitations.
- Le sodium et le silicium sont globalement stables en fonction de la profondeur.
- Calcium, aluminium et nitrate augmentent de A₂ et Bs, puis diminuent fortement de Bs en Bc. Leurs fluctuations, étroitement corrélées en Bs et dans une moindre mesure en A₂ et Bc, traduisent le rôle pilote de l'ion nitrate dans la dynamique de l'aluminium et du calcium. Les concentrations élevées enregistrées en hiver pourraient être partiellement expliquées par les conditions climatiques exceptionnellement chaudes de l'année 1983.

Cet effet de la nitrification sur la mise en solution des cations a été étudiée de manière approfondie en milieu calcaire où de fortes corrélations entre les concentrations en calcium et en nitrate de la solution de drainage ont été observées, (DURAND, 1976 ; FAURIE, 1977).

En milieu acide, les travaux de LIKENS et al. (1970, 1977) à l'échelle d'un bassin versant, et HUTTERMANN et ULRICH (1984) par des techniques lysimétriques, montrent l'augmentation de la solubilisation des cations (en particulier de l'aluminium) et de la silice, corrélativement au développement de la nitrification. Au laboratoire, GRIMALDI démontre, lors de percolation à travers des colonnes de sol en conditions contrôlées, l'influence de la nitrification sur la mise en solution de l'aluminium et dans une moindre mesure du potassium et de la silice.

Par ailleurs, des pertes importantes de cations liées à la nitrification sous des peuplements naturels d'espèces

fixatrices d'azote ont déjà été décrites (van MIGROET et COLE, 1982).

L'explication générale de ce phénomène (LIKENS et al., 1970, van BREEMEN et al., 1983 ; GRIMALDI, 1981) est l'augmentation des hydrolyses par les ions H^+ produits lors de l'oxydation de l'azote organique en nitrate.

Le carbone est présent en faible concentration. Ses fluctuations en fonction de la dilution sont opposées en A_2 et Bs et suggèrent une pénétration profonde de carbone organique parallèle à celle du fer, lors des fortes précipitations. Son rôle spécifique éventuel est masqué par l'importance des nitrates. Enfin, le pH apparaît comme une fonction complexe de l'activité biologique, et de la dilution. Il n'augmente sensiblement qu'en BC.

4.4.1.4 - Etude expérimentale de la minéralisation

Les teneurs en nitrates élevées enregistrées dans cette station, nous ont posé le problème de leur origine. Pour y répondre, nous avons effectué une étude de la minéralisation en conditions contrôlées (voir chapitre III- 2.5).

La transformation de l'azote organique du sol en azote minéral (ammoniacal, nitreux et nitrique) fait appel à deux processus biologiques : l'ammonification et la nitrification

a) Résultats (Fig.23)

Ammonification

L'ammonification est plus forte dans l'horizon superficiel (A_1) et augmente avec la durée d'incubation pour les horizons A_1 et A_2 . Pour l'horizon B, les teneurs en azote ammoniacal sont à peu près stationnaires tout au long de l'essai, et sont plus faibles qu'en A_1 .

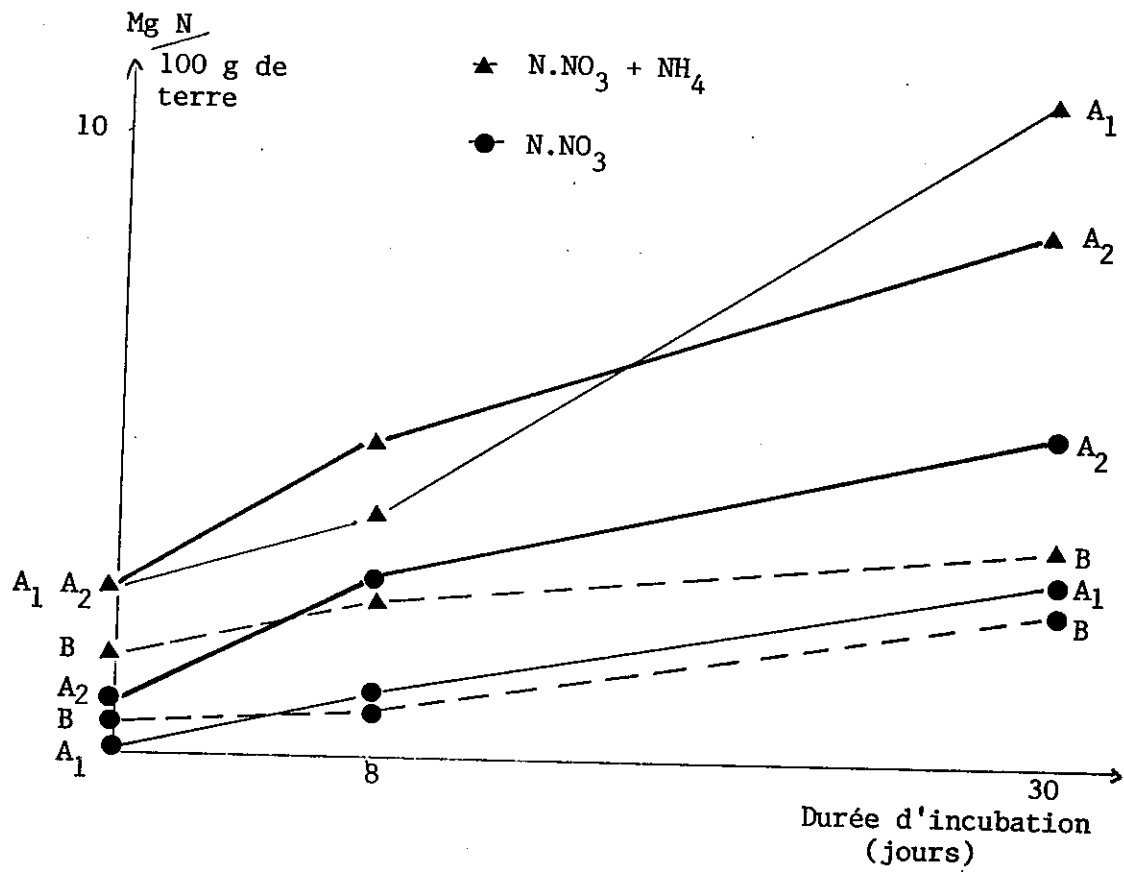


Figure 23 : Evolution des teneurs en azote minéral
lors de la minéralisation du sol de Balme

D'une façon générale, la proportion d'azote ammoniacal par rapport à l'azote minéral total, très élevée dans la terre initiale diminue avec l'incubation pour atteindre une valeur voisine de 30 %, sauf pour l'horizon A_1 riche en matière organique, où elle reste très élevée.

Nitrification

La première phase de la nitrification, c'est-à-dire la transformation de l'azote ammoniacal en azote nitreux, est très fugace, puisqu'il n'est pas possible de mettre en évidence des nitrites ($< 5 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ de terre).

La seconde phase, avec l'apparition des nitrates, apparaît la plus active dans l'horizon A_2 , les horizons A_1 et B se maintenant à des valeurs voisines plus faibles.

La minéralisation de l'azote exprimée par rapport à l'azote total des divers horizons, apparaît faible, comparativement à celle calculée pour les sols cultivés français (SIMON SYLVESTRE, 1969).

Une étude de l'activité nitrifiante a été effectuée par incubation après ajout d'un sel d'ammonium (20 mg d'N NH_4 pour 100 g de terre). Il n'a pas été possible de mettre en évidence une activité nitrifiante, ni d'ailleurs d'activité ammonifiante, à l'opposé de ce que nous avons obtenu avec la terre seule. Nous n'avons pu expliquer de manière satisfaisante ce phénomène.

b) Interprétation

Les résultats obtenus par incubation en laboratoire indiquent, pour le sol étudié, l'existence d'une activité minéralisatrice et nitrifiante, l'intensité de la nitrification apparaissant la plus forte dans l'horizon A_2 . Cette nitrification peut être à l'origine des teneurs relativement

importantes mesurées dans les eaux de drainage.

4.4.1.5 - Interprétation des données lysimétriques

L'étude de la composition des eaux gravitaires de ce sol met en évidence les principaux facteurs qui déterminent son fonctionnement actuel :

La dilution considérable occasionnée par la fonte rapide des neiges et les fortes précipitations automnales est à l'origine de fluctuations importantes de concentration. Le fer semble particulièrement mobilisé pendant ces épisodes de drainage intense.

L'activité biologique est intense : la nitrification provoque une forte mise en solution de nitrate, de calcium et d'aluminium qui sont partiellement exportés hors du solum. L'évolution de la matière organique se traduit par de faibles concentrations en carbone dans les eaux gravitaires, sans qu'il soit possible de mettre en évidence de liaison avec l'aluminium.

Enfin, le recyclage biologique intense limite fortement les pertes, notamment en potassium et magnésium.

4.4.2 - Evolution chimique et minéralogique de vermiculites test

Quatre sachets de vermiculite, deux en A₂ et deux en Bs, ont été implantés en octobre 1984. Nous avons retiré un sachet de chaque horizon au début juillet 1985, et le reste en octobre 1985. Nous n'avons malheureusement pas pu retrouver (touriste, marmotte ou campagnol ?) le deuxième sachet placé en Bs.

4.4.2.1 - Evolution chimique (Fig.24)

- Hiver : augmentation faible de la capacité d'échange. Diminution de la saturation en baryum au profit du calcium et du magnésium. Apparition d'une quantité notable d'Al échangeable, nettement supérieure aux protons, mais sans augmentation de l'aluminium "libre".
- Hiver + été : réduction notable de la CEC (faible par rapport au témoin) au dépens du calcium. Diminution de l'Al échangeable associée à une augmentation des protons et de l'aluminium "libre".

- Horizon Bs -

- Hiver : faible réduction de la CEC et apparition simultanée d'Al échangeable et d'Al "libre". La part occupée par le calcium est très faible.

4.4.2.2 - Evolution minéralogique (Fig.25)

Après saturation potassique, les diffractogrammes des vermiculites testées montrent :

- Horizon A₂ -

- hiver : pic dominant à 11,16 Å, petit pic à 13,87 Å
- Hiver + été : pic dominant à 13,68 Å, pic subordonné à 11,66 Å

- Horizon Bs -

- hiver : pic dominant à 13,68 Å, pic subordonné à 11,66 Å

Après traitement Tamura et saturation potassique, les diffractogrammes des trois échantillons ne présentent plus qu'un pic à 10,06 Å identique au témoin.

Ces évolutions concordent parfaitement avec les évolutions chimiques décrites au-dessus.

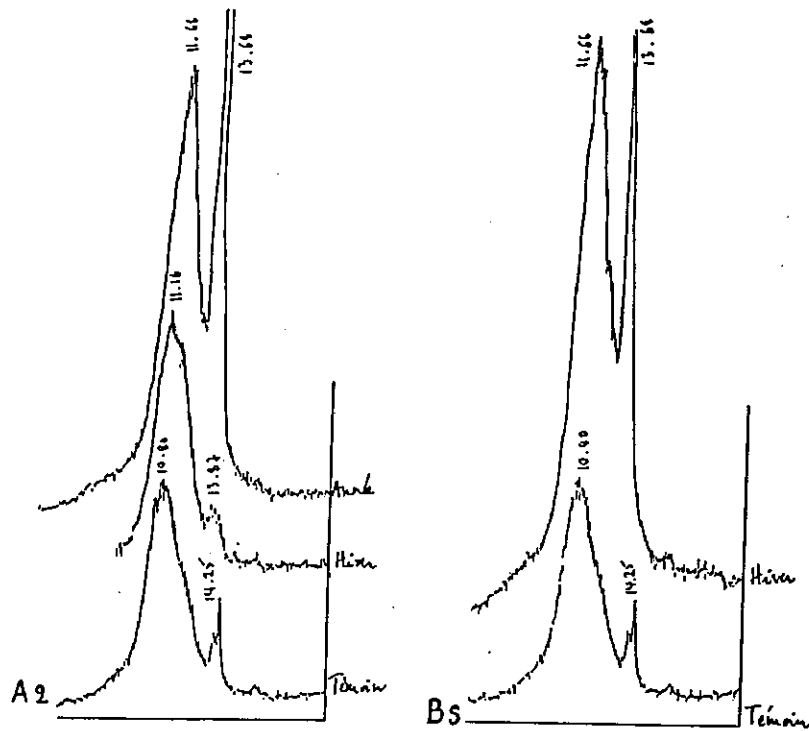


Fig. 25 : Evolution minéralogique des vermiculites en fonction de leur durée de séjour dans les horizons du sol

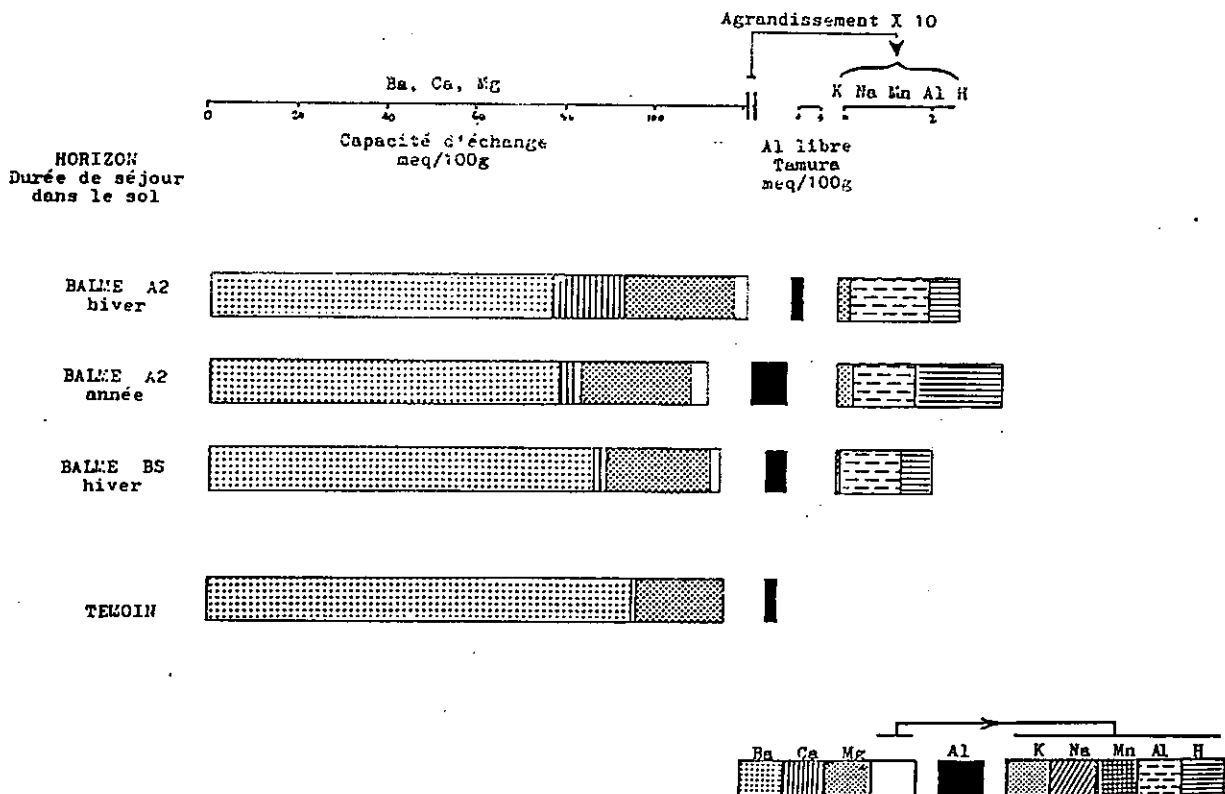


Fig. 24 : Evolution de la CEC, de l'aluminium "libre" et des cations échangeables des vermiculites en fonction de leur durée de séjour dans les horizons du sol

4.4.2.3 - Interprétation

Le fonctionnement hivernal de l'horizon A₂ diffère nettement du fonctionnement estival :

- l'évolution hivernale caractérise un milieu complexant, le calcium étant relativement abondant dans le milieu
- l'évolution estivale traduit l'effet d'un milieu peu complexant et s'appauvrissant en calcium.

En Bs la présence en fin d'hiver d'une CEC élevée associée à une faible fixation d'aluminium interfoliaire peut être interprétée comme résultant d'un milieu faiblement complexant.

4.4.3 - Fonctionnement géochimique actuel et morphologie du profil

La répartition analytique du fer et de l'aluminium de haut en bas du profil indique :

- Une redistribution de fer et d'aluminium des horizons A₁ et A₂ vers l'horizon Bs.
- Un appauvrissement de l'ensemble du sol en fer et surtout en aluminium par rapport à l'horizon BC.

La micro-analyse en place des constituants montre :

- Un enrichissement marqué en fer et aluminium du plasma de l'horizon Bs par rapport à celui de l'horizon A₁.
- La présence dans l'horizon Bs d'une forte concentration de glébules ferromanganiques et de lithoreliques riches en fer et un manganèse et leur absence relative en A₁ et A₂.

- L'absence de concentrations notables de fer et de manganèse autour des racines (gainages racinaires).

L'étude lysimétrique met en évidence :

- Une migration simultanée et profonde à travers les horizons Bs et, en plus faible proportion, les horizons BC, de calcium, d'aluminium et de nitrate ; une fraction de ces produits disparaissant en profondeur, hors de portée des racines. La nitrification, mise en évidence expérimentalement dans cette station, pourrait être à l'origine de tels phénomènes.
- Une faible migration de manganèse à travers l'horizon Bs, vers l'horizon BC, où il s'insolubilise totalement.
- Une faible migration de l'horizon A₂ vers l'horizon Bs de fer et de matière organique prolongée jusqu'en BC lors de très précipitations.

L'évolution des garnitures cationiques des vermiculites test indique :

- En A₂ un milieu complexant pendant l'hiver et peu complexant pendant l'été. Le calcium est éliminé de l'horizon pendant cette dernière saison.
- En Bs un milieu hivernal faiblement complexant.

Ces résultats concordent dans leurs grandes lignes et suggèrent que trois processus biogéochimiques principaux interviennent dans la différenciation actuelle du sol.

- La nitrification, qui se manifeste par des teneurs élevées en nitrates, particulièrement l'été, détermine la mise en solution de nitrate, de calcium et d'aluminium dans

les horizons A₁ A₂ et Bs. Ces éléments migrent profondément, lors des épisodes de drainage, une partie s'insolubilisant au sommet de l'horizon BC. Ce phénomène, confirmé par l'évolution estivale de la saturation des vermiculites tests, pourrait être à l'origine de l'appauvrissement relatif en aluminium de l'ensemble du profil par rapport à l'horizon BC.

- L'hydromorphie se manifeste lors de la fonte des neiges par des gainages racinaires fugaces. Elle pourrait être à l'origine de la migration profonde de fer et de manganèse détectée en lysimétrie et soulignée par l'appauvrissement relatif en fer de l'ensemble du sol, par rapport à l'horizon BC.

- La podzolisation apparaît comme un processus d'importance secondaire. Elle se manifeste par des conditions de milieux complexantes pendant l'hiver. Si nous n'avons pu mettre en évidence de liaison entre les concentrations de carbone (toujours faibles), et d'aluminium dans les eaux gravitaires, on peut penser que la présence de fer dans les solutions gravitaires est liée à des composés organiques complexants.

4.4.4 - Cycle biologique

Le sol étudié est intensément prospecté par les racines d'une pelouse à Nard, canche flexueuse et trèfle des Alpes, dont la productivité aérienne, mesurée en fauchant à hauteur du collet une surface d'un m² a été estimée à 200 g/m² (DORIOZ, communication personnelle, 1985). Cette valeur relativement élevée, correspondant à une productivité totale annuelle d'environ 600 g/m² (SPALTENSTEIN, 1984), peut être attribuée à des conditions climatiques (orientation Sud) et trophiques (sol très fragmenté) assez favorables. A cette forte productivité végétale correspond des teneurs relativement élevées en potassium, calcium, et nitrate dans les eaux lysimétriques, qui témoignent de l'intensité de

l'altération et du cycle biologique.

Les légumineuses, en particulier le trèfle des Alpes constituent une source d'azote importante pour le sol : LABROUE (1981) a mesuré sur une pelouse de flore identique du Pic du Midi de Bigorre une fixation biologique d'environ 1,5 kg/ha/an, c'est-à-dire 1,5 fois supérieure aux apports par les pluies estivales. Cependant, une partie importante de cet azote est minéralisé, nitrifié et éliminé profondément, parallèlement au calcium, hors de portée des racines. Inversement, le potassium et le magnésium sont fortement retenus.

On peut tenter d'estimer les pertes maximales en azote de la station en calculant le flux d'azote drainé dans les lysimètres de l'horizon Bs et ramené à la surface du lysimètre. On obtient les chiffres de 4 et 6 kg/ha/an pour les lysimètres Bs (1) et Bs (2) respectivement. Même en admettant une réduction forte des teneurs de l'horizon Bs en BC, il semble que les pertes de la station soient du même ordre de grandeur que les gains par fixation biologique. Dans ces conditions, le faible rapport C/N de ces sols résulterait d'une minéralisation intense du carbone, compensant les pertes en azote.

Nous n'avons pas étudié la biodégradation dans cette station. L'extraction par la méthode du Berlese, de la faune des horizons A₁ du sol (prélevé à la fin juillet), nous a indiqué une dominance très nette des enchytreides. Cette dominance est d'autant plus remarquable, que la méthode employée présente un mauvais rendement d'extraction vis-à-vis de ces animaux. L'observation en transparence des contenus intestinaux de quelques individus nous ont permis de mettre en évidence des déjections arrondies organominérales d'allure très semblable à celle des micro-agrégats observés en lame mince dans la porosité biologique de l'horizon A₁. On peut en conséquence, penser que ces animaux

sont en grande partie responsable du brassage organominéral observé dès la surface.

La morphologie, faible accumulation de matière organique en surface et mélange organominéral intense, et les caractères analytiques, C/N peu élevé, de l'humus sont des indices d'une biodégradation active. Celle-ci ne doit cependant pas masquer le pourcentage élevé de matière organique incorporé dans le sol, qui témoigne d'une part, de l'importance des restitutions par les racines, et d'autre part, d'un pédoclimat qui, moyenné sur l'année, est globalement froid.

4.5 - CONCLUSION A L'ETUDE DE LA STATION DE BALME

Le sol de la station de Balme, développé à partir d'une isaltérite schisteuse, riche en fer et en manganèse, présente un profil morphologique et analytique caractéristique d'un podzol avec cependant une série de caractères particuliers : un rapport C/N faible, un horizon Bh peu marqué et un appauvrissement en fer et aluminium total de l'ensemble du sol par rapport à l'horizon BC. La porosité des horizons, liée en particulier à la texture limoneuse du matériau est très forte en A_1 et Bs, et plus faible en A_2 .

La station est soumise à un climat contrasté : hiver de très longue durée pendant lequel les sols drainent des quantités variables suivant leur position topographique, mais toujours importantes d'eau de fonte ; été court marqué par une succession de périodes où le sol s'échauffe et s'assèche profondément, et de périodes de drainage intense. Une pelouse riche en légumineuse, dont la productivité est relativement élevée, s'enracine profondément dans ces sols.

Les résultats convergents obtenus par différentes méthodes d'étude nous permettent de penser que trois principaux processus interviennent au cours du fonctionnement saisonnier du sol :

- La nitrification, particulièrement active l'été, favorise la mise en solution et la migration profonde de nitrate, de calcium et d'aluminium.

- L'hydromorphie liée, à la faible porosité conductrice de l'horizon A_2 , se manifeste par des gainages racinaires fugaces et par une migration profonde de fer, lors des épisodes de forte pluviométrie.

- La podzolisation se manifeste par des conditions de milieu complexant pendant l'hiver, sans cependant être associée à de fortes migrations organominérales.

Si l'on définit la podzolisation comme la mobilisation dans les horizons supérieurs, et la migration vers les horizons d'accumulation, de fer et d'aluminium sous l'influence d'acides organiques complexants, il apparaît que la dénomination de "podzolique" attribuée à ce sol en fonction de sa morphologie générale ne correspond que très partiellement avec son fonctionnement actuel. Par contre, ce dernier n'est pas en contradiction "flagrante" avec le profil analytique actuel du sol. L'absence de mesures précises concernant les flux d'éléments drainés et recyclés ne nous permet pas de trancher ce dernier point.

Les trois processus décrits participent à l'appauvrissement des horizons supérieurs du sol. L'activité biologique et la productivité végétale sont cependant relativement intenses. On peut en conséquence penser que les teneurs élevées en cations et en nitrates mesurées dans les eaux gravitaires, favorisent l'activité biologique, et la croissance des espèces végétales profondément enracinées dans ces sols.

5. LOGNAN : PODZOL HUMOFERRUGINEUX SUR MORAINES SOUS UNE LANDE A RHODODENDRON

5.1 - PRESENTATION DE LA STATION

5.1.1 - Présentation générale

La station de Lognan est située à proximité de la Croix de Lognan, à une altitude moyenne de 1950 m. Le cirque du glacier des Grands Montets est encombré à cette altitude de nombreuses moraines latérales et frontales emboîtées, formant de petites crêtes parallèles d'orientation générale Nord-Ouest. Les pentes de ces moraines sont couvertes par des landes à rhododendron. Quelques mélèzes sont dissimulés sur les parties hautes. Certaines crêtes soumises au gel hivernal, car déneigées par le vent, portent une végétation spécialisée dite de "crête ventée". Sur les épandages en pente faible, à la périphérie des moraines se trouvent des pelouses, anciennement pâturées, évoluant actuellement vers la lande.

Végétation des pentes et crêtes non ventées

1 *Larix europaea*
4 *Rhododendron ferrugineum*
4 *Vaccinium myrtillus*
4 *Vaccinium uliginosum*
2 *Empetrum nigrum*
1 *Loiseleuria Procumbens*
1 *Juniperus communis*
4 *Homogyne alpina*
3 *Melampyrum pratense*
2 *Nardus stricta*
2 *Potentilla tormentilla*
1 *Deschampsia flexuosa*
1 *Oxalis acetosella*

Végétation des crêtes ventées

4 *Loiseleuria procumbens*
4 *Vaccinium uliginosum*
3 *Empetrum nigrum*
1 *Rhododendron ferrugineum*
2 *Homogyna alpina*
2 *Avena versicolor*
1 *Deschampsia flexuosa*
1 *Cetraria islandica*
1 *Cladonia rangiferina*

5.1.2 - Morphologie générale et répartition des sols

La prospection des talus de piste entaillant ces moraines, nous a permis de distinguer deux grandes unités de sols en fonction de leur position dans le paysage.

5.1.2.1 - Sols situés sur les crêtes et les pentes faibles sommitales de moraine

Une séquence représentative (Fig.26) a été observée dans un talus de piste incisant la partie amont d'une moraine frontale.

Ces sols se distinguent par les caractères suivants :

- Ils sont développés en place : dans ces positions, nous n'avons jamais observé de sols superposés ou tronqués. Par ailleurs, la très forte charge en éléments grossiers, héritée du matériau morainique, se maintient jusqu'à l'horizon Bh.
- L'horizon Bs₁ est très induré et généralement structuré en polyèdres allongés ou en lentilles parallèles à la pente, séparées les unes des autres par des fissures ouvertes, sur les lèvres desquelles se trouvent des revêtements noirs à brun foncé de quelques mm d'épaisseur. Ces fissures, généralement parallèles à la pente, s'enfoncent parfois profondément (L92) dans la moraine, en recoupant tous les horizons inférieurs. Ce type de structure est généralement attribué à l'action du gel.

5.1.2.2 - Les sols de pente morainique

Ils ont été observés dans des séquences de fosses et sur un talus de piste ceinturant une moraine latérale. Contrairement aux précédents, ils sont extrêmement variables dans les trois dimensions de l'espace. Pour interpréter leur

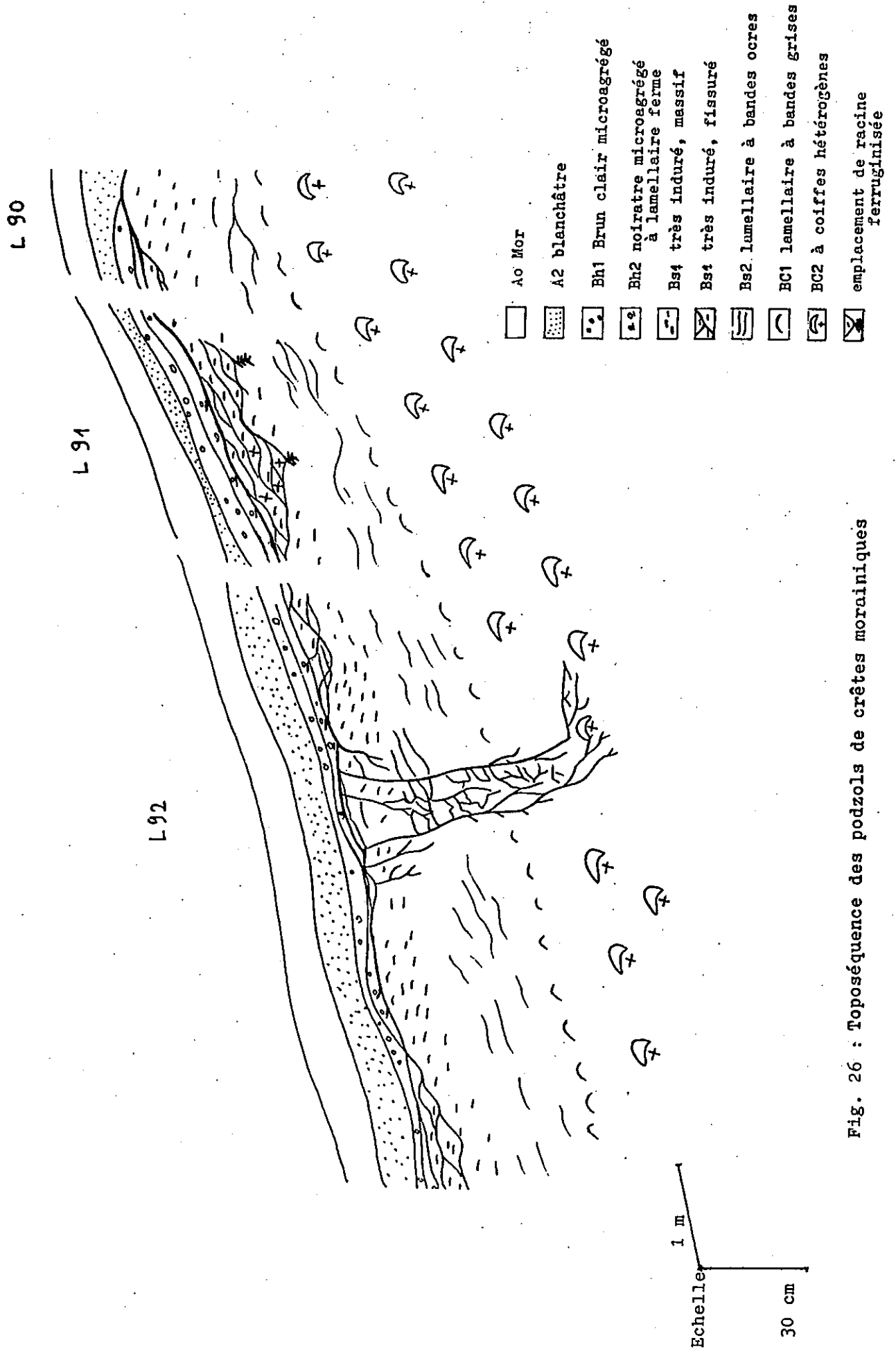


Fig. 26 : Toposéquence des podzols de crêtes morainiques

diversité, plusieurs toposéquences ont été décrites, ce qui nous a amené à les classer suivant quatre pôles.

a) Sols de pente "en place"

La succession des horizons est la même que pour les sols de crête. Ils s'en différencient cependant par des horizons A_0 à couche H dominante, des horizons Bh à structure lamellaire ferme souvent bien développée, enfin des horizons spodiques souvent plus profonds. Cependant, nous n'avons pu établir de relation simple entre l'épaisseur des horizons spodiques et leur position sur la pente.

Les horizons spodiques s'épaissent par endroit, à la faveur de zones à porosité plus grossière, plus chargées en éléments grossiers. La porosité grossière est alors couverte par des revêtements rougeâtres foncés, qui peuvent être très profonds (> 2 m). Nous n'avons jamais observé sur les pentes de fissures verticales profondes identiques à celles mise en évidence sur les crêtes.

b) Sols tronqués de pente forte

L'horizon Bs_2 lamellaire, ferme, à bandes ocres apparaît directement sous un horizon A_1 meuble dont la charge en éléments grossiers est très variable. On observe parfois dans l'horizon A_1 des fragments d'horizons A_0 et A_2 en poches discontinues.

c) Sols colluvionnés de pente moyenne et forte

Les profils présentent une séquence d'horizons inférieurs Bs_1 , Bs_2 , BC identique à celle des sols en place. Au dessus, on observe un ensemble d'horizons peu graveleux, limoneux à limonosableux. L'horizon A_2 , peu marqué ou absent est remplacé par un horizon A_1 épais. L'horizon Bh_1 très meuble, intensément colonisé par les racines repose directement sur l'horizon Bs_1 induré sous-jacent. Lorsque le

matériau colluvionné est plus épais et que le sol enterré n'est pas tronqué, on peut observer des superpositions de podzols, ce qui témoigne de la rapidité de la pédogénèse.

d) Sols développés dans des matériaux très fragmentés de granulométrie homogène

Il s'agit de sols développés dans des poches ou des épandages de bas de pente, non graveleux et de granulométrie homogène, sablo-limoneuse à limono-sableuse. Les horizons A_2 , Bh, et Bs sont meubles, généralement nettement différenciés, et peuvent présenter des traces d'hydromorphie suivant leur position sur la pente. La transition aux sols développés dans des matériaux de granulométrie hétérogène est en général brutale.

On observe sur les pentes des moraines, l'association et la juxtaposition de tous les intergrades entre ces quatre pôles.

Interprétation

- Comme cela avait été noté lors de la prospection générale, les crêtes de moraines se distinguent par leur stabilité dans le paysage. A l'inverse, les pentes sont souvent remaniées.

- Les structures observées dans ces sols sont très généralement parallèles à la pente et donc à priori liées à une dynamique latérale des solutions. Il ne nous a pas été possible de mettre celle-ci en évidence, en suivant l'épaisseur moyenne des horizons le long des pentes. En effet :

- D'une part, les horizons spodiques s'approfondissent irrégulièrement, soit au contact de structures particulières, perpendiculaires à la pente (fissures), soit à l'occasion de zones plus graveleuses à forte porosité d'entassement.
- D'autre part, la fréquence des remaniements s'oppose à l'utilisation du simple critère épaisseur

des horizons (spodiques ou éluviaux) pour juger de l'existence d'une éventuelle dynamique latérale des solutions.

Dans ces conditions, il n'est pas possible de définir le volume de l'horizon éluvial alimentant un volume d'horizon d'accumulation.

- Enfin, l'observation des profils développés sur la pente montre que, malgré les remaniements subis et quelle que soit leur granulométrie, ces sols présentent le plus souvent, en particulier en ce qui concerne les horizons éluviaux, des caractères de podzols. On peut donc penser que les profils de podzols observés sur ce versant correspondent à un fonctionnement actuel.

A la suite de cette prospection, deux profils ont été échantillonnés, l'un en position de crête, l'autre sur la pente. Sur chacun de ces sols, nous avons décrit l'organisation des constituants. Puis, nous avons cherché à analyser les accumulations en position ultime de façon à caractériser le fonctionnement actuel. Par ailleurs, une caractérisation globale des formes du fer et de l'aluminium a été effectuée sur le profil situé sur la pente.

5.2 - DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES SOLS DE REFERENCE

5.2.1 - Description morphologique

a) Podzol humoferrugineux de crête morainique

0-12 cm	A ₀	mor. litière 1 à 2 cm, couche F, 6 cm rougeâtre foncé constituée d'un lacs de racines et d'hyphes intégrant des débris végétaux fragmentés, couche H, 4 cm, noirâtre fibreuse à massive ; très nombreuses racines de rhododendron et myrtilles ; transition diffuse rapide.

- 12-25 cm A₂ gris blanchâtre sableux, structure lamellaire parallèle à la pente, fine, peu nette ; sous-structure particulière ; assez nombreux graviers ; quelques cailloux altérés ; transition rapide diffuse.
- 25-27 cm Bh₁ brun clair ; structure grumeleuse ; grains minéraux sales ; quelques racines fines.
- 27-30 cm Bh₂ brun foncé à noir ; épaisseur variable, parfois absent, parfois plus épais (8 cm) ; structure lamellaire fine ferme ; sous-structure micro-agrégée ; assez nombreuses racines fines.
- 30-45 cm BS₁ brun rougeâtre, induré ; structure en lentilles allongées parallèles à la pente, décimétriques, très dures ; les faces des lentilles sont séparées par des fissures ouvertes d'orientation générale parallèle à la pente, sur les lèvres desquelles on observe des dépôts noirâtres souvent épais (3 mm) ; quelques racines fines colonisent ces fissures. Le matériau, riche en éléments grossiers, constituant les lentilles, présente une porosité variable : les zones sans pores sont jaunes, celles avec des petits pores sont ocre, les parois des gros pores sont brunes. Aucune racine vivante, quelques racines ocre, mortes, dans la porosité ; transition diffuse.
- 45-60 cm BS₂ ocre à gris jaunâtre ; matériau morainique extrêmement poreux, faiblement induré présentant des bandes ocre fines, limoneuses grossièrement parallèles à la pente, autour des éléments grossiers. Aucune racine ; transition diffuse.
- 60-70 cm BC₁ gris jaunâtre ; matériau identique à bandes grises
- > 70 cm BC₂ gris jaunâtre avec de nombreuses poches blanchâtres ; horizon ferme mais très friable ; matrice à structure particulière avec de nombreuses poches blanchâtres constituées de sables lavés entassés sans liant. Les éléments grossiers très nombreux, portent des coiffes hétérogènes, très fermes et adhérentes, sur leurs faces amont. On observe dans les coiffes des poches blanchâtres de sables lavés. La face inférieure des éléments grossiers est lavée et repose sur des sables et graviers en entassement libre.

b) Podzol humoferrugineux de pente morainique développée "en place"

10 cm	A ₀	L + F rougeâtre 2 cm H 8 cm noirâtre massif très nombreuses racines ; transition diffuse 1 à 2 cm.
10-18 cm	A ₂	blanc grisâtre assez net ; structure polyédrique subanguleuse moyenne. Sableux, quelques racines fines ; transition rapide.
18-30 cm	Bh	noirâtre à brun rougeâtre foncé à la base, texture plus fine, assez peu d'éléments grossiers ; structure polyédrique sous-structure lamellaire assez ferme, quelques racines ; transition diffuse par une zone plus rougeâtre.
30-60 cm	Bs	ocre ; induré. Structure lamellaire fine, quelques revêtements plus foncés sur des faces de lentilles ; très peu de racines, évoluant en profondeur vers un matériau brun jaunâtre coloré, moins induré à structure lamellaire, sans bandes ocres ; transition diffuse 5 cm.
60-100	BC	Matériau morainique identique à celui décrit sous les podzols de crête.

5.2.2 - Organisation et micro-analyse de quelques constituants

Les descriptions présentées concernent l'ensemble des horizons du podzol situé sur la pente, et l'horizon Bs₁ du podzol situé sur la crête morainique. Seuls les caractères qui nous ont semblé être les plus immédiatement en rapport avec le fonctionnement biologique et géochimique actuel du sol ont été notés.

5.2.2.1 - Podzol de pente (Fig. 27)

A₀E Squelette très rare ou absent n'apparaissent qu'à la transition avec l'horizon A₂. Assemblage lâche d'agrégats bruns, à forte porosité surtout anguleuse, formée de débris végétaux noircis non reconnaissables, de nombreux micro-agrégats (50 µm) brun sombre arrondis à ovales le plus souvent coalescents et d'une masse indifférenciée. On observe de très nombreux granules arrondis noirs

généralement opaques qui correspondent à des sclérotés d'un champignon mycorhyzien (*Cenococcum graniforme*) dont l'accumulation est fréquente dans les mor (MEYER, 1964) ou à des fructifications d'ascomysetes mélanisés. Les grains minéraux qui n'apparaissent qu'à la transition avec l'horizon A₂ se trouvent soit libres dans des vides, soit intégrés dans le plasma brun.

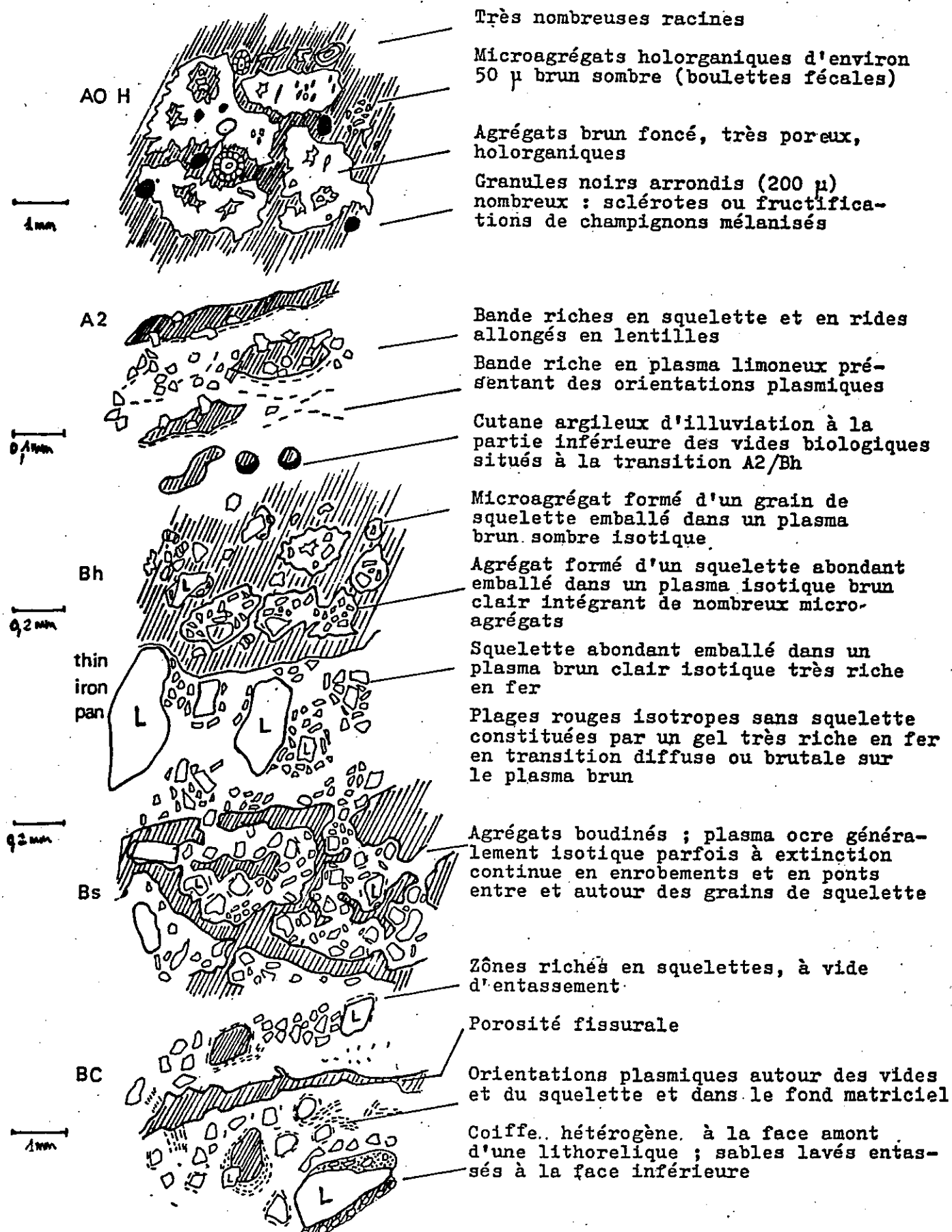
A₂ Superpositions de bandes riches en plasma limoneux, peu poreuses, et de vides allongés, souvent occupés par des grains de squelette. Ces bandes forment des lentilles discontinues d'environ 0,1 mm d'épaisseur et de quelques mm de long, parallèles à la pente. On observe des orientations plasmiques en bordure des vides qui se trouvent à la face supérieure des bandes riches en plasma. A la base du A₂ apparaissent de nombreux chenaux de racines. Certains de ces vides, arrondis, portent à leur partie inférieure, des dépôts argileux orientés.

Bh Porosité variable, mais généralement importante pouvant couvrir jusqu'à 50 % de la surface de la lame. Dans les zones très poreuses, on observe des agrégats arrondis bruns isotropes (50 µm) souvent groupés et des agrégats (50-200 µm) formés de quelques grains de squelette micacé emballés dans un plasma isotique brun. Des agrégats du même type ont été observés par LORPHELIN (1985) dans des sols podzolisés du Népal et séparés par tri magnétique : les premiers proviendraient de l'activité biologique (déjection), les seconds, d'une précipitation physico-chimique. Dans les zones plus denses, on observe des agrégats à contours arrondis constitués de nombreux grains de squelette emballés dans un plasma brun clair isotique. La micro-analyse de ces plasmas indique des teneurs très faibles en silice et des teneurs en fer supérieures aux teneurs en aluminium ; les autres éléments sont présents à des teneurs non significatives.

Transition Bh - Bs : "Thin iron pan"

La transition brutale se fait par un "thin iron pan" discontinu d'environ 1 mm d'épaisseur constitué par des zones de plasma brun dense isotique emballant de très nombreux grains de squelette entre lesquelles on observe des plages de plasma rouge lisse isotrope sans grains de squelette. La transition entre les deux plasmas est souvent diffuse. La porosité est nulle. La micro-analyse des deux plasmas indique qu'ils sont essentiellement constitués par du fer, le plasma brun apparaissant légèrement plus riche.

Fig. 27 : Organisation, à l'échelle microscopique, des horizons d'un podzol, situé sur la pente



Horizon BS (partie supérieure)

Plasma ocre isotique abondant, emballant les grains fins du squelette, formant des enrobements entre et autour des grains du squelette grossier. L'ensemble est structuré en agrégats "boudinés" séparés par une porosité allongée ou arrondie à bords lisses. Le plasma ocre généralement isotique, situé en bordure de vide, présente parfois une extinction forte continue. La micro-analyse du plasma ocre indique une teneur en fer élevée, mais cependant inférieure à celle du "thin iron pan" (Tableau 15).

TABLEAU 15

Composition relative en % d'oxydes de quelques plasmas
(Podzols de pente)

	Nombre d'analyses	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Total
Plasma brun Horizon Bh	(10)	1	4,4	7,4	14,3
Plasma brun "thin iron pan"	(4)	1,3	3,6	46,8	54,5
Plasma rouge "thin iron. pan"	(4)	2,7	4,2	38	47,5
Plasma jaune cutanique horizon Bs	(7)	1,8	4	14,8	24

Interprétation

L'humus présente un noircissement général des tissus végétaux, une accumulation de formes mycéliennes résistantes à la dégradation, et une absence quasi-totale de brassage organominéral. Ces caractères sont fréquents dans les mor. L'horizon A₂, dont la structure en bandes peut être attribuée à des phénomènes d'illuviation et/ou de gel, est parcouru par une porosité conductrice d'orientation parallèle à la pente.

La genèse des "thin iron pan" a été largement étudiée (De CONINK et RIGHI, 1969), De CONINK et al., 1973). Elle fait intervenir un colmatage par des dépôts organiques et/ou minéraux qui provoque une remise en solution du fer de l'horizon Bh sous l'influence d'un milieu temporairement réducteur.

En ce qui concerne ces sols, la présence de cutanes illuviaux à extinction forte et continue à la partie supérieure de l'horizon Bs, constitue un élément en faveur d'un colmatage d'origine minéral consolidé par des dépôts organométalliques. Dans le "thin iron pan", la distribution du plasma rouge, dans les zones sans squelette, par rapport au plasma brun, emballant les grains du squelette, indique que le plasma rouge s'est formé postérieurement au plasma brun. Les teneurs légèrement plus élevées en fer du plasma brun, ainsi que le caractère souvent diffus de la transition, laisse penser que le plasma rouge a été nourri, au moins partiellement, par le plasma brun. Les différences considérables de teneur en fer entre "le thin iron pan" et le plasma de l'horizon Bh pourraient provenir d'une remobilisation du fer de l'horizon Bh, sous l'influence d'un milieu réducteur.

5.2.2.2 - Podzol de crête

La description présentée (Fig.28) concerne les agrégats indurés, allongés en lentilles, de l'horizon Bs. Les faces de ces lentilles, séparées par des fissures, sont couvertes d'un revêtement épais, brun foncé à noir, isotique, montrant par endroit, une structure racinaire. La micro-analyse de nombreux revêtements nous a montré une teneur systématiquement plus élevée (# 2 fois) en aluminium qu'en fer (Tableau 16). L'intérieur des lentilles montre une porosité abondante dont les bords sont revêtus par des cutanes isotiques de couleur ocre plus riches en fer qu'en aluminium et souvent plus riches en titane. On observe dans la

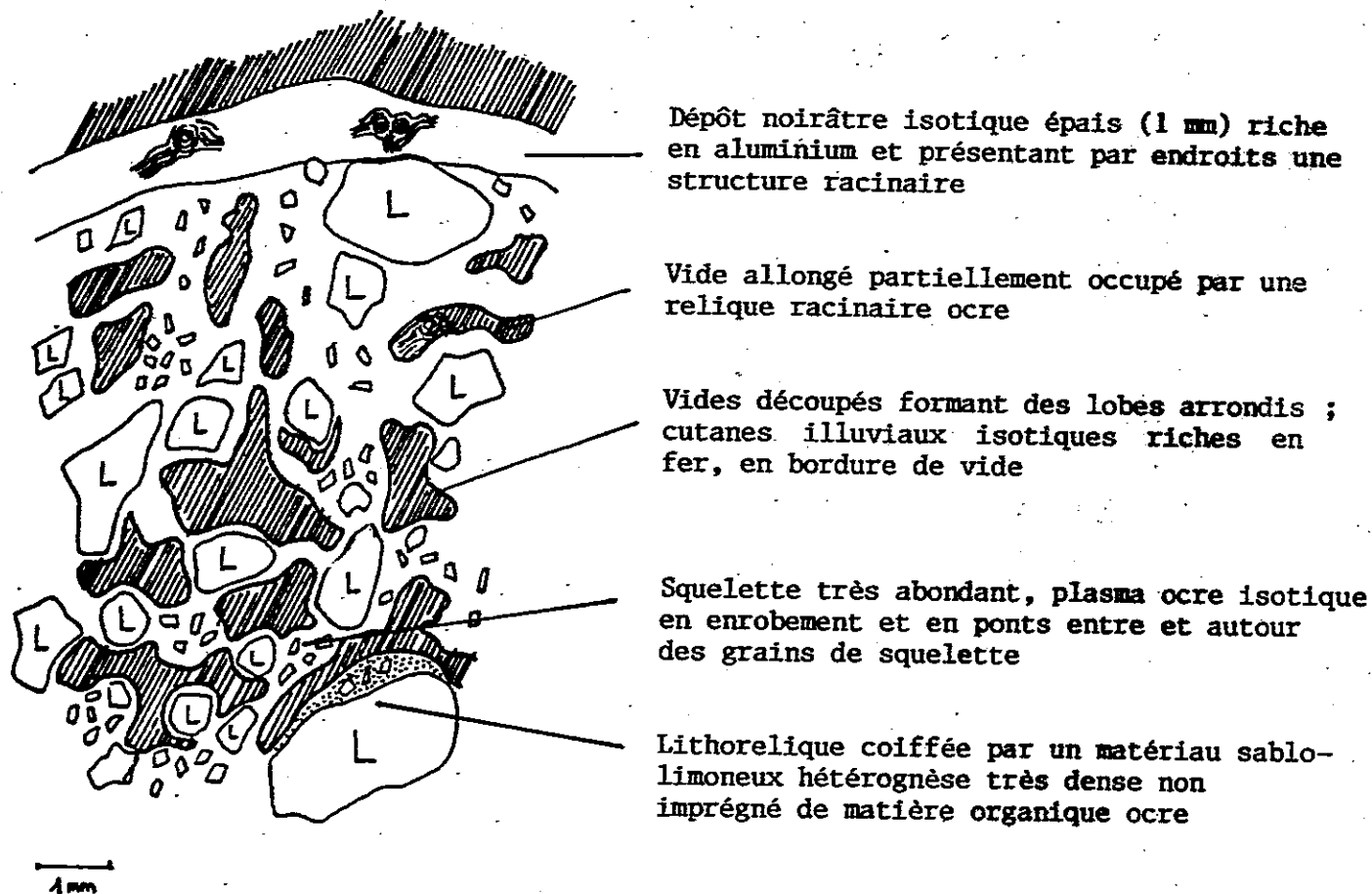


Figure 28 : Organisation à l'échelle microscopique, d'un fragment d'agrégat induré en lentille ; horizon BS, podzol de crête

Tableau 16 : Composition chimique relative de différents plasma

Plasma	Nombre d'analyses	% pondéral			
		Si	Al	Ti	Fe
Revêtement noir sur les lentilles	(9)	0,15	7,5	0,2	3,2
Cutanes ocres isotiques en bordure des vides dans les lentilles	(5)	0,4	5,6	1,4	11,9
Reliques racinaires ocres dans les vides des lentilles	(3)	0,1	6	0,2	9,7

porosité de certains agrégats indurés, de très nombreuses reliques racinaires ocres dont la composition se rapproche de celle des cutanes ocres (Tableau 16).

Interprétation

La macroporosité conductrice de l'horizon Bs est formée par un réseau de fissure, déterminant des agrégats en lentilles dont les faces sont couvertes par des dépôts à dominance alumineuse. On peut penser que ces dépôts reflètent la composition chimique des solutions gravitaires qui les alimentent actuellement.

Les teneurs plus élevées en fer mises en évidence dans les cutanes et les reliques racinaires ocres des agrégats indurés en lentilles pourraient résulter des conditions de drainage différentes, ou/et d'une phase de pédogenèse plus ancienne.

5.2.3 - Données analytiques (Fig.29)

5.2.3.1 - Caractères généraux

Le taux très élevé de matière organique en surface traduit la faiblesse du brassage organominéral par la faune, pour partie liée à la nature des résidus végétaux (Rhododendron : C/N 70). Ce taux s'affaisse brutalement en A₂ pour réaugmenter en Bh et diminuer à nouveau en Bs. L'évolution granulométrique traduit une intense fragmentation en surface auquel se superpose une redistribution en profondeur. Le ventre d'argile en Bh peut être mis en relation avec la présence de cutanes d'illuviation observée en lames minces à la base du A₂ et dans l'horizon Bs. Le pH, très bas en surface (< 4) ne s'élève au-dessus de 5 qu'en BC. Les courbes de capacité d'échange, d'argile et de matière organique sont parallèles. Inversement, le taux de saturation de la capacité d'échange est maximal en A₂.

5.2.3.2 - Evolution des formes du fer et de l'aluminium

L'évolution du fer indique :

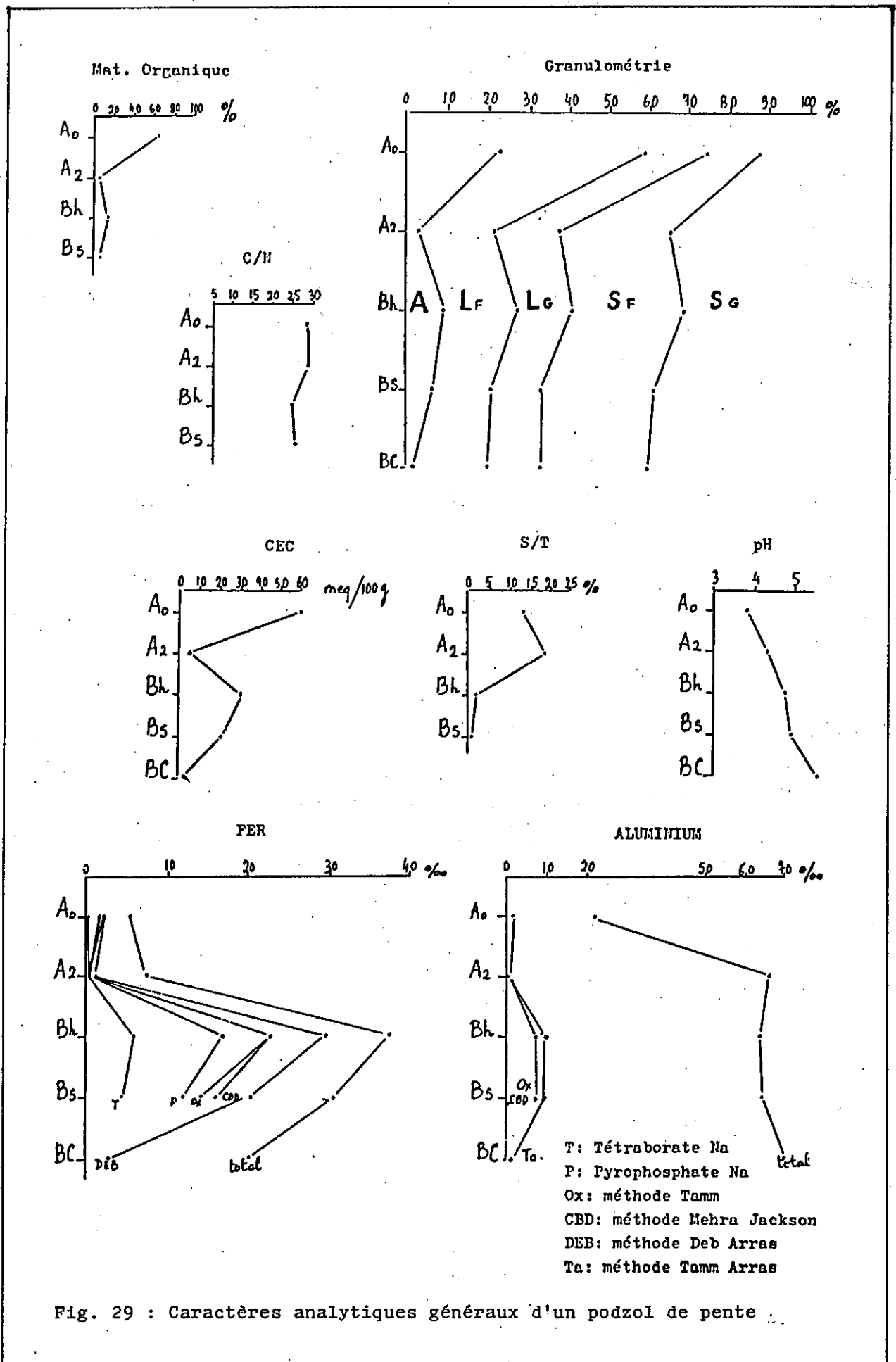
- Une forte diminution de la fraction "fer silicaté" de bas en haut du profil.
- Une redistribution considérable de fer amorphe organique de haut en bas du profil, à l'origine d'une accumulation absolue en Bh et Bs. Le maximum de fer libre enregistré en Bh peut être mis en relation avec la présence du "thin iron pan" diffus observé en lames minces à la base du Bh.
- La disparition en Bh d'une faible fraction de "fer oxyde" présente en BC.

L'évolution de l'aluminium est moins tranchée, elle indique :

- Une stabilité remarquable de l'aluminium total (calculé par rapport à la matière minérale) de bas en haut du profil, excepté en A₀.
- L'apparition d'une fraction notable d'aluminium amorphe en Bh et Bs qui confirme la redistribution observée en lames minces.
- Des teneurs identiques extraites par les réactifs de Tamm et Mehra-Jackson, ce qui suggère une absence d'allophane.

5.2.3.3 - Interprétation

Le profil étudié montre une très forte redistribution de fer et d'aluminium amorphe caractéristique des podzols. Le matériau résiduel disponible en A₂ pour l'altération est très appauvri en fer, mais pas en aluminium. Cette "disponibilité relative" pourrait constituer l'un des facteurs limitant de l'altération actuelle.



5.3 - PEDOCLIMAT

5.3.1 - Régime thermique

Les températures ont été enregistrées à 10 cm au-dessus du sol sous les rhododendrons, et à -10 cm (A_0) et -40 cm (B_s) dans le sol. Le commentaire détaillé des fluctuations saisonnières se trouve associé à celui de la station du Lavancher (Chapitre III-6.3).

Seuls les principaux caractères sont exposés ici :

- La température de l'air à 10 cm au-dessus du sol subit de fortes fluctuations : l'amplitude maximale journalière observée est de 18°C. L'air, dont la capacité calorifique est plus importante qu'à l'étage alpin, est partiellement retenu sous le couvert de rhododendron et peut par conséquent s'échauffer pendant la journée. La nuit, l'absence de couvert forestier facilite de fortes pertes thermiques.
- A l'inverse, les températures dans le sol à -10 cm sont très fortement tamponnées : l'amplitude maximale journalière mesurée est de 1°C. L'humus brut, très poreux, dépourvu d'éléments grossiers et dont la capacité de rétention en eau est considérable amortit les fluctuations thermiques dès la surface.
- La température à -40 cm suit approximativement en été la ligne des minimas à -10 cm et en automne, la ligne des maximas à -10 cm : le sol, très mauvais conducteur de la chaleur est généralement plus chaud à -40 cm qu'à -10 cm, pendant l'automne.
- Sous la neige, la température du sol est généralement positive et proche de 0°C. Seules les zones déneigées par le vent gèlent profondément. On observe une bonne corrélation entre la présence d'une strate dense de rhododendrons et l'absence de gel du sol automnal.

5.3.2 - Régime hydrique

Les relevés pluviométriques provenant d'un pluviomètre totalisateur installé à quelques centaines de mètres de la station étudiée indiquent une pluviométrie moyenne annuelle de 1700 mm dont environ 1000 mm sous forme de neige.

5.3.2.1 - Régime hydrique des sols sous la neige

Le régime de fonte de la neige est subdivisé en deux périodes par les chercheurs du Centre d'Etude de Neige de Grenoble :

- Une période d'accumulation de la neige qui correspond à un gradient de température négatif dans le manteau neigeux. Pendant cette période, la fonte due au flux géothermique a été estimée à 0,8 mm/jour à partir de mesures en bacs lysimétriques effectuées sous prairie à l'étage montagnard (DAVID et al., 1971).
Les sols sont alors alimentés faiblement, mais constamment en eau. L'évapotranspiration étant nulle, les sols drainent lentement.
- Une période de fonte pendant laquelle la température du manteau nival est homogène et stabilisée à 0°C. Le flux, mesuré dans les mêmes conditions, varie entre 10 et 50 mm d'eau/jour suivant la température atmosphérique. Il s'agit alors d'une véritable "chasse d'eau" qui traverse le sol.

L'étude des profils de température dans la neige, qui sont effectués par les pisteurs, à proximité de notre station, pour déterminer les risques d'avalanches, permet de préciser localement ces deux périodes (Fig.30).

- De décembre à la fin avril, le gradient de tempéra-

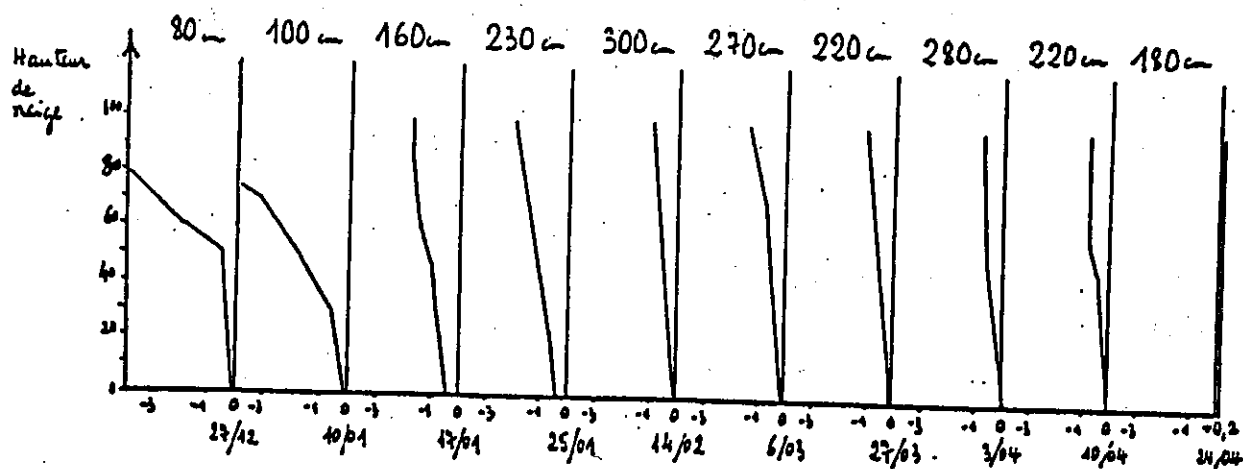


Fig. 30 : Hauteur de neige et température
dans le premier mètre de neige
LOGNAN 83-84 Données Télémétrique des Grands Montets

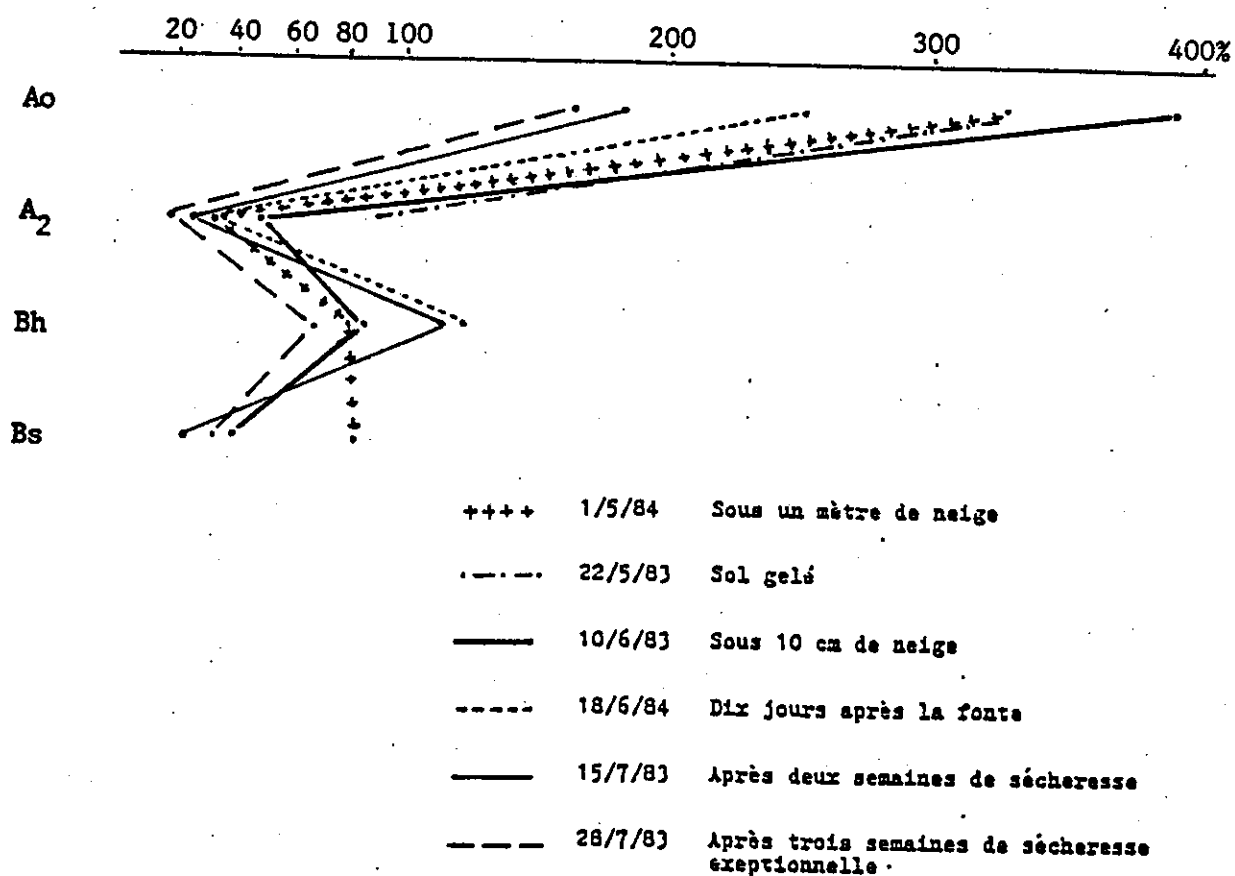


Fig. 31 Présentation de quelques profils hydriques
Caractéristiques d'un podzol de Lognan

- ture dans la neige est inférieur à 0°C . On doit cependant remarquer la présence d'air chaud au contact du sol dès le début avril ($+ 0,2^{\circ}\text{C}$ le 3/4) qui témoigne d'une fonte nettement amorcée.
- Les eaux lysimétriques, relevées le 30 avril sous 1,5 m de neige, correspondent donc en majeure partie à cette période.
 - De fin avril jusqu'à la fonte totale (mi-juin), le sol draine rapidement et abondamment.

5.3.2.2 - Fluctuations saisonnières de la teneur en eau dans un profil de pente (Fig. 31)

En l'absence de dispositifs d'étude en continu de la teneur en eau des profils, nous avons prélevé périodiquement les différents horizons, dans une zone située sur la pente morainique et correspondant à des sols du type de celui décrit précédemment : sol de pente en place à horizon A_0H et Bh épais. Cependant, les variations granulométriques latérales des horizons sont à l'origine d'une relativement forte variabilité (10-20 %) des teneurs en eau pour le même horizon prélevé. Les fluctuations présentées, en particulier en ce qui concerne l'horizon Bh, nous semblent donc exagérées.

En A_0 , les teneurs pondérales varient entre 150 et 400 % d'eau, la capacité de rétention, estimée par des prélèvements quelques jours après de fortes pluies, est de l'ordre de 250 à 300 % d'eau. Ces très fortes teneurs ne sont pas réparties uniformément dans l'humus. Lors des périodes pluvieuses, la partie superficielle (L + F) est nettement plus humide que la couche H. A l'inverse, la couche H apparaît toujours fraîche même pendant les périodes de sécheresse prolongées.

Cette forte capacité de rétention en eau explique les faibles volumes drainés à travers les lysimètres pendant

l'été. En effet, considérons un humus brut de 15 cm d'épaisseur et de densité apparente 0,2 (CABIDOCHÉ, 1979), une précipitation de 30 mm se traduira par l'élévation de sa teneur en eau de 200 % à 300 %, ce qui n'entraînera pas pour autant de drainage dans la porosité gravitaire des horizons inférieurs.

En A_2 , les teneurs en eau chutent très fortement parallèlement à la teneur en matière organique. Ces teneurs ne sont cependant jamais très basses (20 % lors de la sécheresse de 1983), vu la texture sableuse de l'horizon. L'amplitude des fluctuations est faible, les teneurs maximales apparaissent lors du gel du sol (93 %) ; l'eau remplit alors sous forme de glace, la porosité allongée en lentilles observée précédemment en lames minces.

En Bh et Bs, les teneurs en eau augmentent, puis diminuent parallèlement à la teneur en colloïdes organiques et minéraux. Les variations granulométriques latérales de l'horizon ne permettent pas d'interpréter directement les fluctuations observées en Bh.

Interprétation

Le régime hydrique du sol étudié se caractérise par des fluctuations importantes de teneur en eau de l'humus brut et par de faibles fluctuations de ces teneurs dans les horizons inférieurs. L'humus brut exerce un rôle d'amortisseur vis-à-vis des précipitations estivales, du fait de sa forte capacité de rétention en eau.

Modifications du régime hydrique le long de la pente

Le régime hydrique décrit précédemment ne concerne que les sols en place situés sur la pente de la moraine. En effet, des teneurs en eau mesurées lors d'épisodes de sécheresse, dans des positions hautes de la moraine, montrent

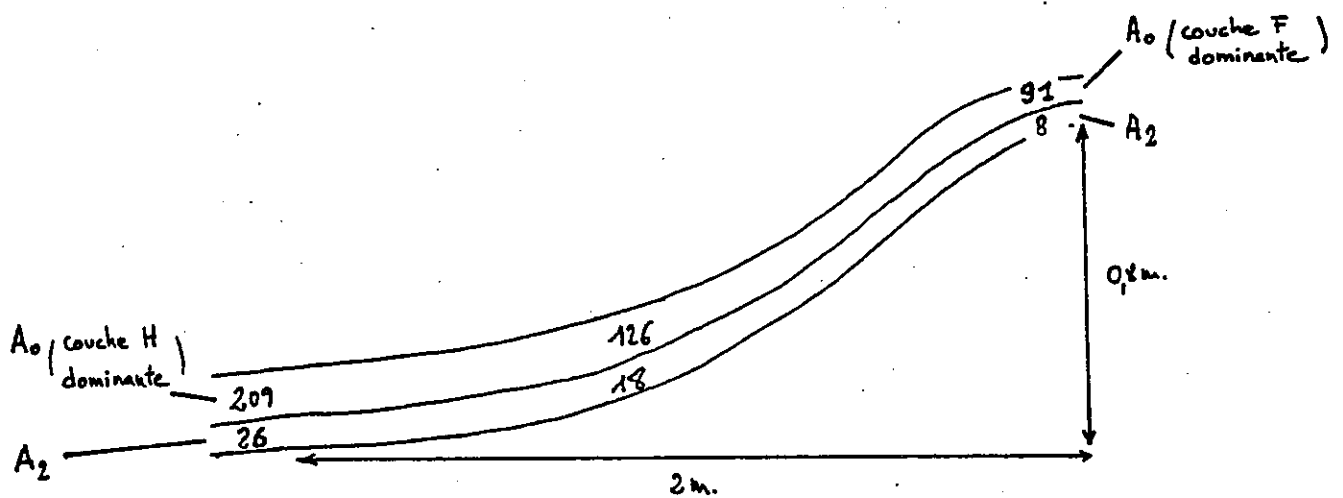


Fig. 32 : Teneurs en eau, mesurées le long d'un transect perpendiculaire à la pente, recoupant une loupe de solifluxion et le creux adjacent, après 2 semaines de sécheresse.

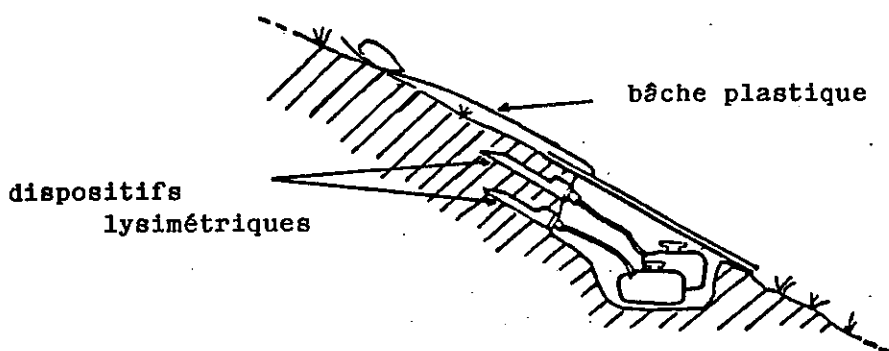


Fig. 33 : Dispositif mis en place pour mettre en évidence une éventuelle dynamique latérale des solutions.

qu'elles subissent un dessèchement estival beaucoup plus marqué (Fig.32 et Tableau 17).

TABLEAU 17

Teneurs en eau au sommet et sur la pente
de la moraine lors d'un épisode de sécheresse

15/7/83 Après 2 semaines	Horizon	Sommet de moraine	Pente morainique
	A ₀	121	184
Teneur en eau (%)	A ₂	9	22

Par ailleurs, l'ouverture de fosses pédologiques tout au long de la pente, nous a permis d'observer la stagnation d'eau dans les fosses, à des niveaux très variés, lors de la fonte des neiges ou de très fortes précipitations. Cette stagnation d'eau n'est jamais apparue dans les fosses situées à proximité de la crête.

Cette opposition entre les régimes hydriques des sols de pente en position basse et ceux affectant les sols en position de relief, nous a conduit à nous interroger sur l'existence d'une dynamique latérale des eaux gravitaires le long de la pente.

Pour y répondre, deux tranchées équipées de lysimètres, situées l'une à proximité de la crête, l'autre sur la pente, ont été modifiées. Nous avons déposé sur le sol des bâches plastiques sur un espace couvrant les lysimètres et les dépassait sur plus d'un mètre à l'amont (Fig.33).

Ce dispositif a été installé durant une période de fortes pluies (juin, 1985). A l'issue de cette période, nous avons contrôlé les volumes d'eau recueillis par les différentes gouttières dans les deux positions testées. Seul le

lysimètre situé en Bs sur la pente avait drainé une quantité notable d'eau, les lysimètres situés en A₀ en bas de pente ou en A₁, A₂ et Bs en haut de pente nous ont fourni des volumes négligeables.

Interprétation

Il semble donc qu'une dynamique latérale des eaux gravitaires apparaisse, lors de très fortes précipitations, dans les horizons d'accumulation des sols situés sur la pente. Cette dynamique latérale pourrait participer à l'assèchement estival marqué des positions hautes de la moraine, non alimentées latéralement et à l'opposé, à la stabilité des teneurs en eau en profondeur sur les pentes.

Les hauteurs de nappe très variées, notées lors de la fonte des neiges dans les profils creusés le long de la pente, confirment nos observations morphologiques ; cette dynamique latérale n'est pas généralisée, elle suit des cheminements préférentiels le long de la pente et peut disparaître en profondeur à l'occasion de structures particulières.

Enfin, l'existence à certaines périodes, d'une nappe circulante perchée, pourrait être à l'origine des concentrations locales de fer ("thin iron pan") observées lors de l'étude microscopique.

5.4 - ETUDE DU FONCTIONNEMENT BIOGEOCHIMIQUE ACTUEL DES SOLS

5.4.1 - Etude lysimétrique

5.4.1.1 - Domaine de validité des données

Onze lysimètres ont été implantés en juin 1983 à partir de quatre tranchées. La variabilité des sols exposée précédemment ne nous a pas permis d'équiper des profils rigoureusement identiques.

Chaque tranchée est indiquée par un chiffre romain. Dans une tranchée, chaque lysimètre est répertorié suivant l'horizon dans lequel il se trouve. Lorsque plusieurs gouttières sont implantées à partir de la même tranchée, dans un même horizon, elles sont différenciées par un chiffre entre parenthèse. La liste des tranchées et des gouttières correspondantes est la suivante :

Tranchée I : creusée sur la crête de moraine, profil type de sol de crête. 2 lysimètres implantés en A_2 ($A_2(1)$ et $A_2(2)$).

Tranchée II : creusée sur la pente à quelques mètres de la crête, profil type de sol de crête. Trois lysimètres implantés en A_1 , A_2 et A_2 -Bh.

Tranchée III : creusée sur la pente, profil type de podzol de pente en place. Deux lysimètres en A_0 ($A_0(1)$ et (A_0)(2) et 1 en Bs.

Tranchée IV : creusée sur la pente, profil type de podzol faiblement colluvionné en surface. Deux lysimètres en A_1 ($A_1(1)$ et (A_1)(2).

Tranchée V : creusée sur la pente, profil type de podzol colluvionné en surface. Un lysimètre en Bs.

Les valeurs moyennes des concentrations calculées sur les périodes où tous les lysimètres ont fonctionné (Tableau 18) présentent, pour des lysimètres placés dans des horizons identiques, une assez grande homogénéité. L'absence de lysimètre dans les horizons A_2 et Bh des sols sur la pente ne nous a pas permis de percevoir l'influence, sur la composition des solutions, d'une circulation de nappe.

Nous présenterons dans le texte, les données provenant de quatre lysimètres dont trois sont situés sur la pente (A_0 , A_1 , Bs) et un sur la crête (Bh). Ce choix a été fait pour présenter les données les plus complètes, en effet, les lysimètres placés sur la crête ont été affectés, soit par la sécheresse (Lognan I et II), soit par le gel (Lognan I), ce qui a fortement réduit les volumes drainés. Les interprétations présentées tiennent cependant compte de l'ensemble des données.

stat	gout	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	NO3	NH4	C
Lognan	I_A21	1.605	0.239	0.590	0.947	0.436	0.173	0.000	0.229	0.000	0.000	17.058
Lognan	I_A22	1.338	0.168	0.512	0.822	0.315	0.142	0.000	0.284	0.000	0.000	6.854
Lognan	II_A1	1.047	0.155	1.155	0.575	0.659	0.235	0.000	0.261	0.000	0.000	16.640
Lognan	II_A2	0.825	0.107	1.300	0.847	0.574	0.272	0.000	0.250	0.000	0.000	13.731
Lognan	II_Bh	1.467	0.183	1.067	0.570	0.460	0.143	0.000	0.147	0.000	0.000	9.200
Lognan	III_A01	0.527	0.242	1.420	0.424	0.191	0.176	0.000	0.178	0.000	0.000	16.427
Lognan	III_A02	0.877	0.175	1.207	0.445	0.151	0.133	0.000	0.159	0.000	0.000	13.641
Lognan	III_Bs	0.615	0.100	0.190	0.716	0.218	0.028	0.000	0.075	0.000	0.000	3.685
Lognan	IV_A11	0.927	0.261	1.131	0.656	0.648	0.254	0.000	0.445	0.000	0.000	18.900
Lognan	IV_A12	1.304	0.310	1.336	0.687	0.599	0.323	0.000	0.404	0.000	0.000	22.535
Lognan	IV_Bs	1.173	0.170	0.362	0.535	0.132	0.033	0.000	0.129	0.000	0.000	3.918

Tableau 18 : Valeurs moyennes des concentrations, calculées à partir des dates où tous les lysimètres ont fonctionné. (29/06, 12/09, 23/10)

5.4.1.2 - Analyse des fluctuations saisonnières par horizon

L'azote n'est pas représenté sur les graphiques ; en effet, nous n'avons jamais détecté d'azote minéral dans les eaux de drainage et ceci quelque soit l'horizon.

- Horizon A₀ - (Fig.34)

Les seules données dont nous disposons proviennent de deux lysimètres situés sur la pente.

Cations métalliques - Les teneurs en calcium et potassium sont du même ordre de grandeur (< 2 ppm) et fluctuent parallèlement. On observe un fort maximum estival et deux maximums secondaires ; l'un pendant l'hiver (30/4), et l'autre peu marqué, lors de la chute des feuilles (23/10).

- Sodium et magnésium ont un comportement identique : faibles teneurs (< 0,5 ppm) et faibles fluctuations, le sodium dominant toujours le magnésium.
- Aluminium, silice et fer sont présents en faibles concentrations. Les fluctuations de l'aluminium et de la silice sont peu marquées et montrent un léger maximum estival. Le comportement du fer est plus irrégulier.
- Le manganèse est absent.

Carbone, pH

- Les évolutions du carbone et du pH sont opposées et fortement corrélées avec la dilution : les teneurs en carbone sont maximales, et le pH est minimal pendant la fonte hivernale, lorsque le drainage journalier est faible, et pendant l'été où l'évaporation associée aux faibles précipitations limite fortement le drainage. A l'inverse, les teneurs en carbone sont faibles et le pH est élevé lors des épisodes de drainage intense, à la fonte rapide des neiges, ou à la fin de l'automne, lorsque la température redevenue plus faible ne permet pas à l'évapotranspiration de compenser les précipitations.

LOGNAN

A0

A1

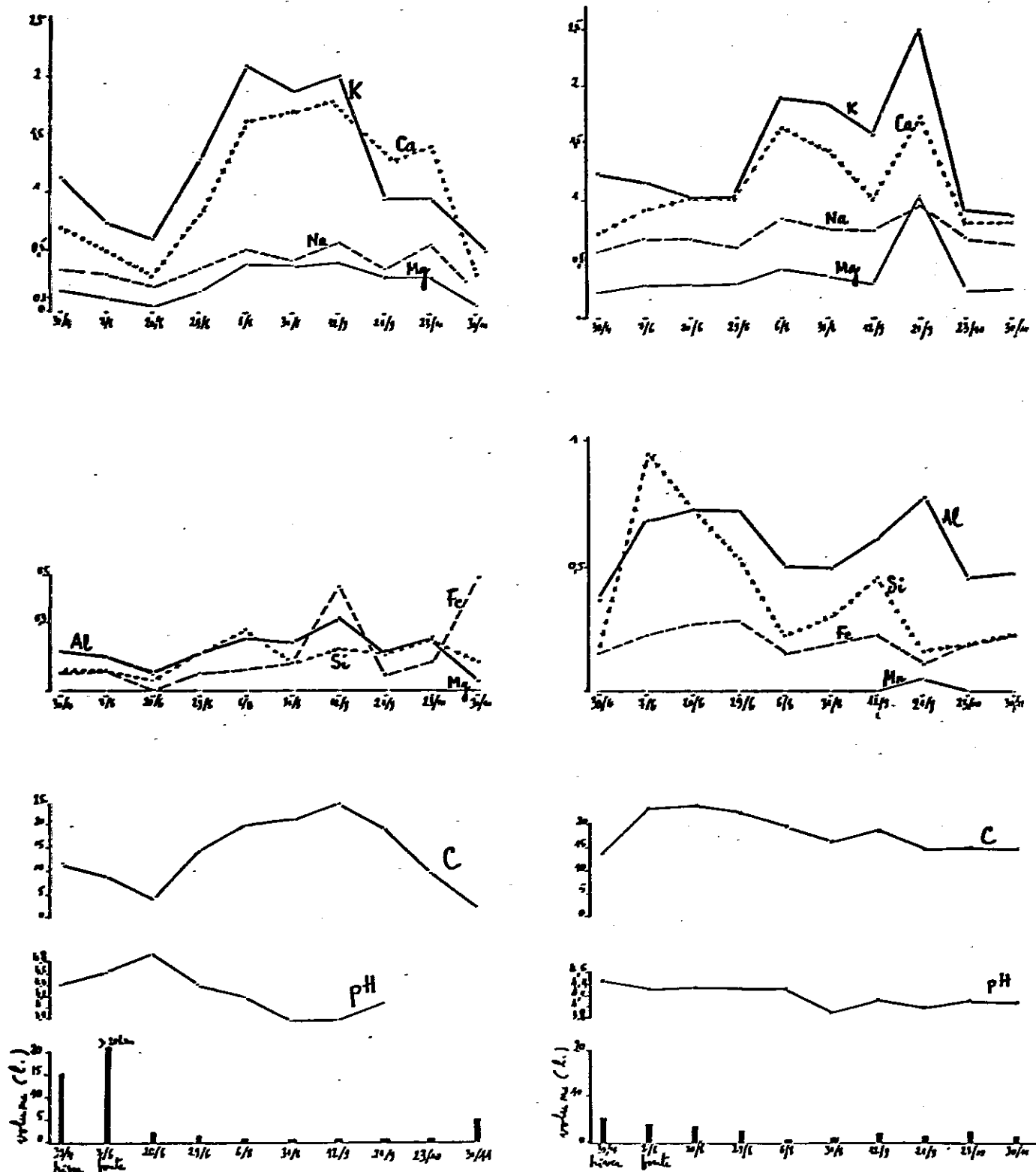
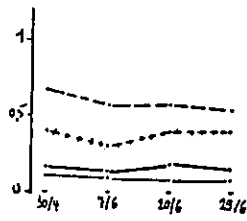
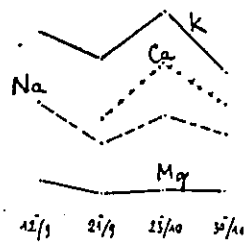
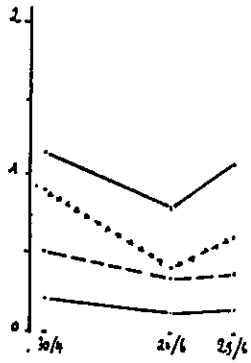


Fig. 34 : Fluctuations saisonnières des volumes drainés, du pH et des concentrations des eaux gravitaires.

Lognan, lysimètres III A₀ (1) et IV A₁ (1)

BH



BS

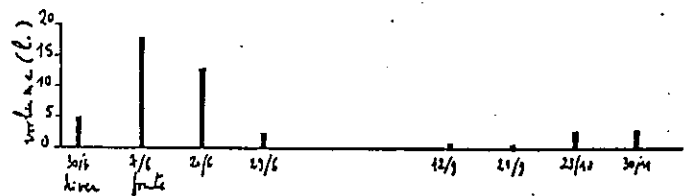
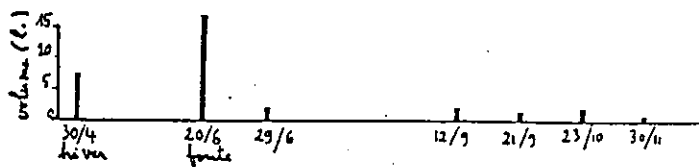
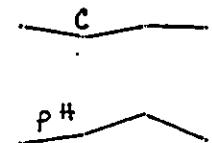
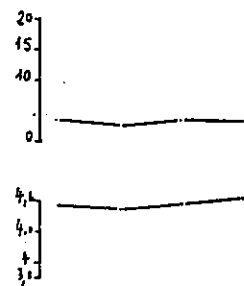
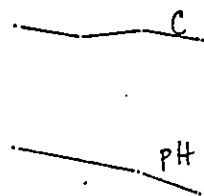
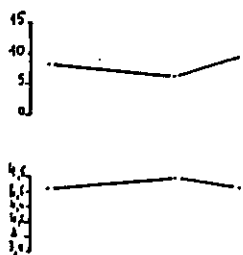
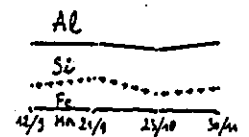
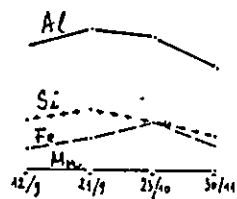
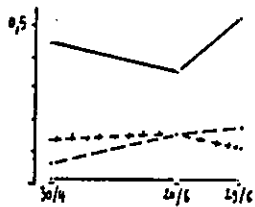
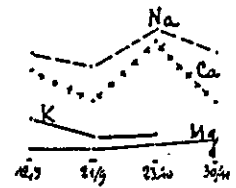


Fig. 35 : Lognan, lysimètres II Bh et III Bs

Interprétation

Les variations des concentrations en éléments dans les eaux de drainage de l'horizon A_0 semblent essentiellement liées à un facteur de dilution/concentration. Cette dilution masque l'influence de l'activité biologique estivale.

- Horizon A_1/A_2 - (Fig.34)

Lors du prélèvement du 30 avril 1984, nous avons constaté la présence, sous 1,5 mm de neige, d'une croûte de glace de regel au-dessus des lysimètres de la tranchée IV, d'où proviennent les données analytiques présentées. Cette couche de glace au-dessus du sol pourrait être à l'origine des très faibles volumes d'eau obtenus à travers ces lysimètres pendant l'hiver et lors de la fonte rapide des neiges.

Cations métalliques - Calcium et potassium subissent des fluctuations parallèles, toutefois moins marquées qu'en A_0 . Le maximum estival observé en A_0 disparaît en A_1/A_2 pour les lysimètres placés sur la pente. Il est très atténué dans les eaux provenant des lysimètres qui subissent une forte sécheresse estivale (I et II). Les lysimètres situés sur la pente présentent un maximum automnal (le 21/9) et un maximum hivernal, coïncidant avec de très faibles volumes drainés.

- Le sodium, présent en concentrations plus fortes qu'en A_0 et le magnésium subissent d'assez faibles fluctuations, avec un maximum le 21/9.
- Aluminium, silice et fer sont présents en concentrations nettement plus élevées qu'en A_0 . Leurs fluctuations sont approximativement parallèles. Les lysimètres (IV) affectés par la glace de regel présentent un maximum à la fonte des neiges, les autres présentent à cette époque un minimum lié à une forte dilution. Tous les lysimètres présentent un maximum en fin d'été (12/9 ou 21/9)

plus ou moins marqué. Les teneurs en aluminium sont en moyenne deux à trois fois plus élevées que celles en fer et fluctuent parallèlement aux teneurs en carbone.

- Le manganèse n'est pas dosable.

Carbone, pH

- Leurs fluctuations sont plus faibles que celles enregistrées en A_0 . Les teneurs en carbone qui varient parallèlement à celles en aluminium sont peu corrélées avec les fluctuations du pH et avec la dilution. Ces corrélations sont plus nettes pour les lysimètres situés en haut de pente (I et II) qui subissent une forte sécheresse estivale.

Interprétation

Les teneurs en bases et en carbone mesurées en A_1/A_2 sont peu différentes en moyenne de celles mesurées en A_0 . Par contre, les concentrations en silice, aluminium et fer augmentent fortement et fluctuent parallèlement à la teneur en carbone. Les teneurs des solutions provenant des lysimètres placés sur la crête et sur la pente sont peu différentes. Par contre, les évolutions saisonnières des éléments en solution les distinguent. Ces comportements différents peuvent être mis en relation avec des différences de régime hydrique.

- Horizon Bh et Bs - (Fig.35)

Cations métalliques - Par rapport aux concentrations mesurées en A_2 , les teneurs en calcium et potassium sont faibles en Bh et très faibles en Bs. Les teneurs en potassium en particulier chutent fortement de Bh en Bs, tandis que les teneurs en sodium augmentent. Enfin, on observe en Bh un faible pic de concentration en calcium, sodium et potassium le 23/10 lors de la chute des feuilles.

- Les teneurs en aluminium, en fer, en silice et en carbone diminuent de A_2 en Bh, puis en Bs où le fer s'insolubilise totalement. Les fluctuations de leurs concentrations, qui sont faibles en Bh, deviennent négligeables en Bs.

Conclusion

Les éléments mis en solution à la partie supérieure du profil s'insolubilisent partiellement en Bh, puis et surtout en Bs. Une quantité non négligeable de calcium et de sodium est cependant éliminée profondément à travers l'horizon Bs induré.

5.4.1.3 - Interprétation

La dynamique des éléments en solution observée à travers les dispositifs lysimétriques est caractéristique de la podzolisation : mobilisation importante de fer, d'aluminium et de matière organique dans les horizons A_0 A_1 et migration vers les horizons Bh et Bs où ils s'insolubilisent. Elle est très semblable à celle mise en évidence en lysimétrie par VEDY (1978) et BONNE (1981) sur le podzol de Biffontaine, mis à part des teneurs moyennes généralement plus faibles. Les fluctuations saisonnières de concentration sont fortes dans l'horizon A_0 et s'atténuent dès les horizons A_1/A_2 pour disparaître en Bs. Cette évolution peut être mise en relation avec le régime hydrique des sols, les fortes variations de teneur en eau n'affectant, sur les pentes morainiques, que la partie superficielle du profil.

5.4.2 - Evolution chimique et minéralogique de vermiculites test

Six sachets de vermiculite saturée en baryum ont été implantés (deux en A_0H , deux en A_2 , deux à la transition Bh-Bs) dans un podzol faiblement colluvionné, en pente forte, au mois d'octobre 1983 ; un échantillon par horizon a été relevé au début juillet 1984, un mois après la fonte de la neige, le restant au début octobre. La période estivale considérée se monte donc à trois mois.

5.4.2.1 - Evolution chimique (Fig.36)- Horizon A₀ -

Hiver	- stabilité de la CEC, substitution de magnésium et calcium en faible quantité, au baryum
	- présence d'Al échangeable comme d'Al "libre" en faible quantité
Hiver + été	- réduction notable de la CEC associée à une forte fixation d'aluminium interfoliaire
	- forte dominance des protons sur l'aluminium échangeable
	- forte régression du baryum au profit des cations "biologiques" Ca, K

- Horizon A₂ -

Hiver	- faible diminution de la CEC associée à de faibles teneurs en Al libre et échangeable
	- calcium peu abondant à l'inverse du potassium
Hiver + été	- réduction notable de la CEC associée à la fixation d'aluminium libre en quantité importante
	- augmentation du calcium
	- forte dominance des protons sur l'aluminium échangeable

- Horizon Bs -

Hiver	- forte réduction de la CEC liée à une forte fixation d'aluminium interfoliaire
	- désaturation notable en baryum et magnésium au profit du calcium
Hiver + été	- très forte réduction de la CEC en relation avec une forte augmentation de l'aluminium interfoliaire
	- augmentation du calcium
	- forte dominance des protons sur l'Al échangeable
	- apparition de fer libre en quantité non négligeable

Comparaison A₀-A₂-Bs

L'évolution annuelle pour tous les horizons se traduit par une réduction notable (A₀ et A₂) ou très forte (Bs) de la capacité d'échange, liée à la fixation d'aluminium interfoliaire, par une augmentation du calcium et par une nette

dominance des protons sur l'aluminium échangeable.

La dynamique saisonnière sépare les horizons A_0 et A_2 du Bs ; en effet, la capacité d'échange an A_0 et A_2 est stable pendant l'hiver et diminue notablement au cours de l'été. Par contre, la capacité d'échange de l'horizon Bs diminue fortement dès l'hiver. De plus, la saturation en magnésium qui augmente dès l'hiver pour les horizons A_0 et A_2 décroît fortement en Bs.

5.4.2.2 - Evolution minéralogique (Fig. 37)

Après saturation potassique, les diffractogrammes indiquent :

- Horizon A_0 -

hiver	- pic large à 11,64 A
Hiver + été	- pic large à 11,80 A, épaulement peu marqué à 14,25 A

- Horizon A_2 -

hiver	- pic large à 11,64 A
Hiver + été	- pic large à 11,64 A, épaulement marqué à 13,68 A

- Horizon Bs -

hiver	- pic dominant à 13,68 A, pic subordonné à 11,80 A
Hiver + été	- pic unique à 13,87 A

Après traitement Tamura et re-saturation potassique, les échantillons provenant des horizons A_0 et A_2 ne présentent plus qu'un pic à 10,06 A identique au témoin. L'échantillon hivernal placé en Bs présente en plus, un épaulement marqué à 10,80. L'échantillon annuel présente un pic dominant à 11,40 A et un pic subordonné à 10,06 A.

5.4.2.3 - Interprétation

L'évolution des minéraux placés en Bs traduit, quelle que soit la saison, un milieu non complexant et confiné vis-

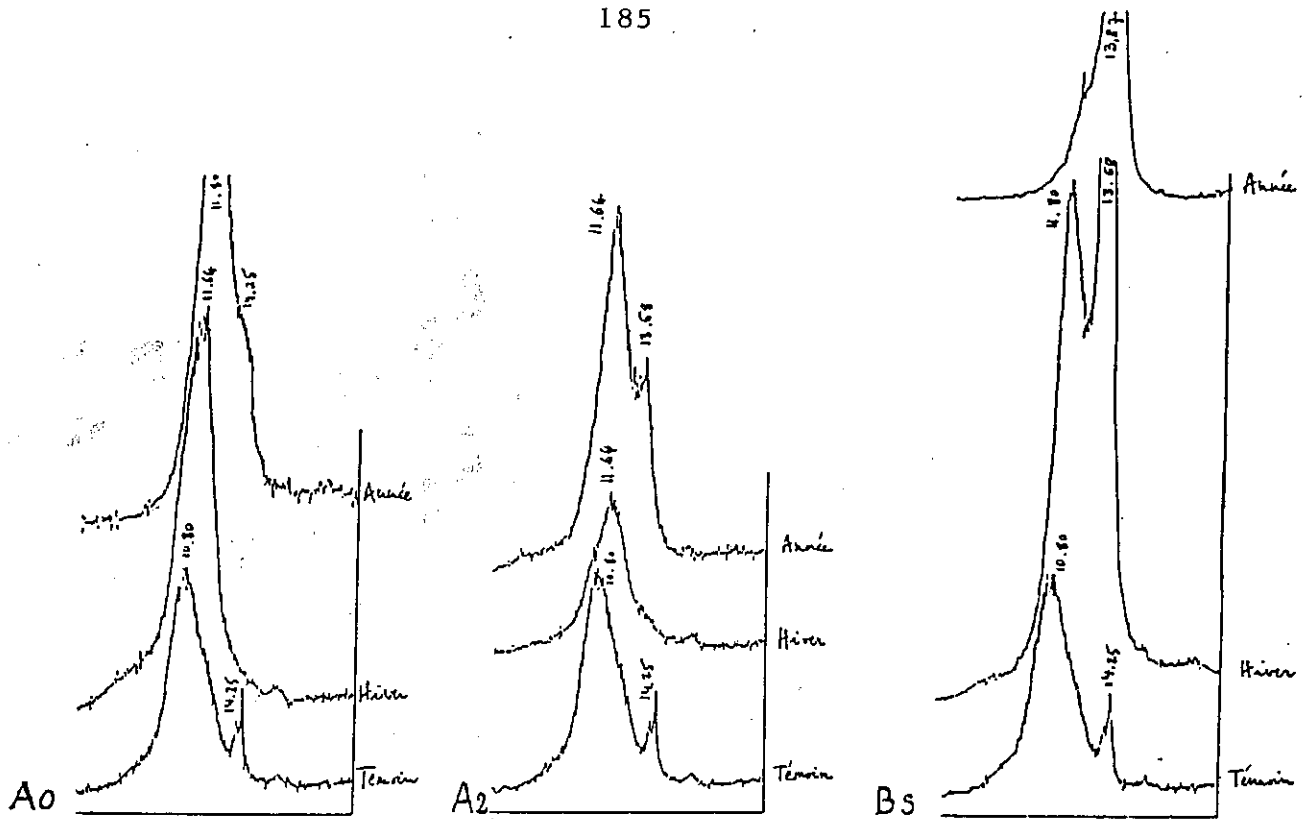


Fig. 37 : Evolution minéralogique des vermiculites en fonction de la durée de séjour des vermiculites dans les horizons du sol.

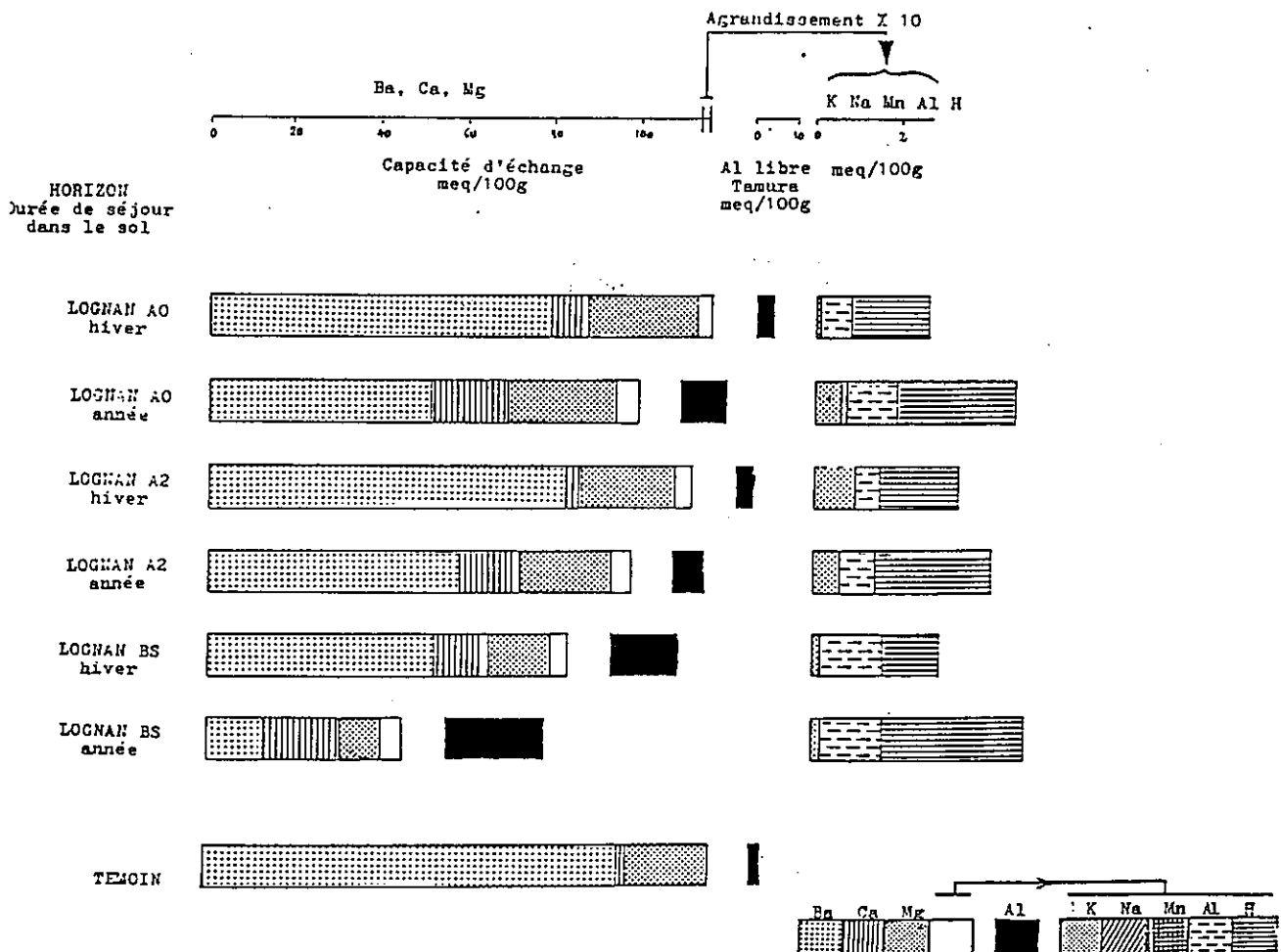


Fig. 36 : Evolution de la CEC, de l'aluminium "libre" et des cations échangeables en fonction de la durée de séjour des vermiculites dans les horizons du sol

-à-vis de l'aluminium. Par contre, les horizons A_0 et A_2 semblent fonctionner différemment suivant la saison : fonctionnement hivernal complexant, fonctionnement estival peu complexant, associé à une forte activité biologique surtout en A_0 .

Les forts taux de matière organique mesurés pendant la période estivale dans les eaux lysimétriques des horizons A_0 semblent contredire les affirmations précédentes suivant lesquelles cet horizon constituerait pendant l'été un milieu faiblement complexant. Si l'on exclue un artéfact expérimental lié au dispositif, il faut admettre, pour dépasser cette contradiction déjà rencontrée dans les stations précédentes, que la teneur en matière organique dans des eaux gravitaires ne constitue pas un critère suffisant pour juger de l'agressivité organique d'un milieu. Cette hypothèse est plausible. On sait en effet que les acides organiques simples produits par la microflore en quantité importante dans la porosité fine des sols podzolisés, se transforment très rapidement en molécules complexes à haut poids moléculaire (acides fulviques), de sorte qu'ils ne sont présents qu'en très faibles concentrations dans les eaux gravitaires (BONNE, 1981 ; BRUCKERT, 1970). Or, ces polycondensats sont peu agressifs vis-à-vis des minéraux du sol et en particulier des vermiculites (ROBERT *et al.*, 1979), contrairement aux acides simples. La nature des composés organiques, dont on peut penser qu'elle dépend directement des modalités de l'activité biologique, plus que la teneur en carbone devrait être prise en compte.

5.4.3 - Synthèse : fonctionnement géochimique actuel et morphologie du profil

Les variations des teneurs en éléments des eaux gravitaires lors de leur percolation à travers les profils concordent avec la morphologie des sols. De plus, les rapports Al/Fe mesurés dans les eaux lysimétriques sont proches (# 2) de ceux analysés dans les revêtements noirs épais qui

couvrent les bords de la porosité fissurale grossière des horizons Bs des sols de crête. Cette correspondance entre la composition des eaux gravitaires rapides obtenue en lysimétrie et celle des dépôts placés dans la porosité grossière des horizons d'accumulation constitue un argument majeur en faveur d'une faible perturbation du fonctionnement du sol par les dispositifs lysimétriques.

La faiblesse de la mobilisation actuelle du fer par rapport à celle de l'aluminium peut être mise en relation avec le fort appauvrissement en cet élément des horizons supérieurs du sol. Il semble en effet, que la mobilisation du fer ait été privilégiée, lors d'une phase antérieure de pédogénèse, comme en témoigne la richesse relative en fer des dépôts placés dans la porosité interne des agrégats indurés en lentilles des sols de crête.

5.4.4 - Relation entre le cycle biologique et le fonctionnement géochimique du sol

La moraine porte une lande dense à rhododendron et myrtille enracinée très superficiellement dans les sols, et dont la productivité aérienne, mesurée en récoltant l'ensemble des feuilles et des pousses annuelles de ces plantes, se monte à environ 150 g/m^2 . Sur une partie de la crête morainique, moins enneigée, se développe une végétation naine de "crête ventée" dont la productivité aérienne, non mesurée, semble très faible. Cette "pauvreté biologique" locale peut être mise en relation avec des teneurs nettement plus faibles en potassium enregistrées en lysimétrie dans cette position (lysimètres I en annexe).

Les chutes de litière se produisent durant toute la saison estivale pour le rhododendron et sont concentrées à l'automne pour la myrtille.

Du fait de l'enracinement extrêmement superficiel de ces plantes, on peut considérer que les remontées biologiques à partir des horizons Bs, très indurés, des sols de

crête sont très faibles. En conséquence, les flux drainés à la base de l'horizon A_2 correspondent essentiellement à l'altération. Ces flux d'altération peuvent être estimés (Tableau 19) à partir des données des lysimètres placés dans les horizons A_1 et A_2 et peu affectés par une dynamique latérale des solutions. Les lysimètres concernés sont ceux de la tranchée II située à proximité de la crête.

Si l'on ramène les volumes d'eau drainés pendant l'hiver par ces lysimètres, à leur surface d'ouverture, on obtient une hauteur d'eau équivalente voisine de 300 mm pour les deux lysimètres. Ce chiffre semble très faible par rapport aux précipitations générales sous forme de neige que l'on peut estimer à environ 1000 mm dans cette station. Une des causes de ce déficit est la redistribution de la neige sous l'action du vent, due à la proximité de la crête de la moraine. Si ce paramètre, que nous n'avons pas mesuré, doit sans doute être pris en compte, il nous semble cependant insuffisant pour expliquer une telle différence de drainage. Les flux calculés (Tableau 19) sont donc vraisemblablement sous-estimés par rapport aux flux réels. Cependant, l'ordre de grandeur nous semble valable.

Par ailleurs, le calcul du temps nécessaire pour fournir au rythme mesuré une quantité d'aluminium égale à celle qui se trouve sous forme amorphe dans les horizons Bh et Bs de ces sols, et que l'on peut estimer entre 1 et 2 kg/m^2 , indique des valeurs de 6.000 à 12.000 ans, ce qui correspond avec l'âge généralement attribué à ces moraines.

Ce raisonnement n'est pas exact sur la crête ventée où les sols gèlent pendant une partie ou toute la durée de l'hiver, ce qui limite d'autant une fourniture hydrique déjà déficiente. Dans ce cas, il faut faire intervenir, pour expliquer la différenciation de podzols dans ces positions, soit une variabilité climatique interannuelle telle que certaines années, ces sols ne gèlent pas et subissent un enneigement notable, soit des fluctuations climatiques

anciennes.

Inversement, sur la pente morainique, l'alimentation latérale par une nappe perchée multiplie la fourniture hydrique et donc les flux d'éléments minéraux drainés en toutes saisons.

La comparaison entre les flux d'aluminium et de fer, drainés dans les eaux gravitaires des podzols de haut de pente, et ceux restitués à la surface du sol par la litière de rhododendron et myrtille (Tableau 19) met en évidence l'importance du cycle biologique de ces éléments (JUSTE, 1966 ; DRISCOLL, 1985). Le flux de fer et d'aluminium dans les litières correspond approximativement au tiers des flux drainés en profondeur.

TABLEAU 19

Flux drainés, calculés à partir des teneur mesurées dans les eaux gravitaires de deux lysimètres situés sur la crête, et flux restitué en surface par les litières (mg/m²)

Lysimètre	Ca	Mg	Al	Fe	Mn	Si
II A1	223,6	43,6	172,3	109,4	0	105,4
II A2	330	41,5	221,4	73,6	0	16,3
Flux dans les litières	1170	290	75,5	33,5	100	

5.5 - ETUDE DE LA BIODEGRADATION DE LA MATIERE ORGANIQUE

La biodégradation de la matière organique à été abordée à travers trois études parallèles et complémentaires :

5.5.1 - Mesure du dégagement de gaz carbonique à la surface du sol

Le dégagement de CO₂ à la surface du sol a été mesuré lors de six périodes, d'une semaine chacune environ, répar-

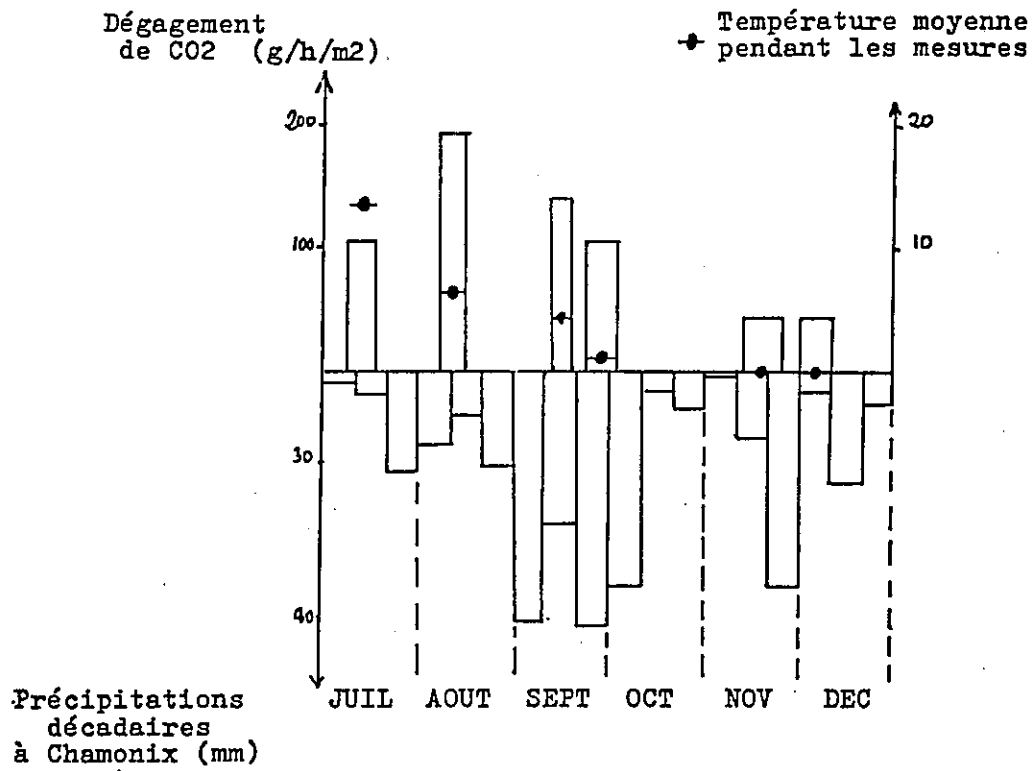


Fig. 38 : Dégagement de CO₂ mesuré à certaines périodes de l'année à la surface du sol.

ties entre juillet et décembre 1984. Les valeurs (Fig.38) obtenues s'étagent entre 46 et 193 mg/h/m², ce qui est faible relativement au stock de matière organique concerné. Le dégagement de CO₂ obtenu pendant la période la plus chaude et la plus sèche est nettement inférieur au maximum mesuré pendant une période plus humide et moins chaude. Ceci suggère une influence défavorable de la sécheresse sur la minéralisation. Enfin le dégagement de CO₂ sous la neige (1er au 12 décembre) se maintient à un niveau non négligeable.

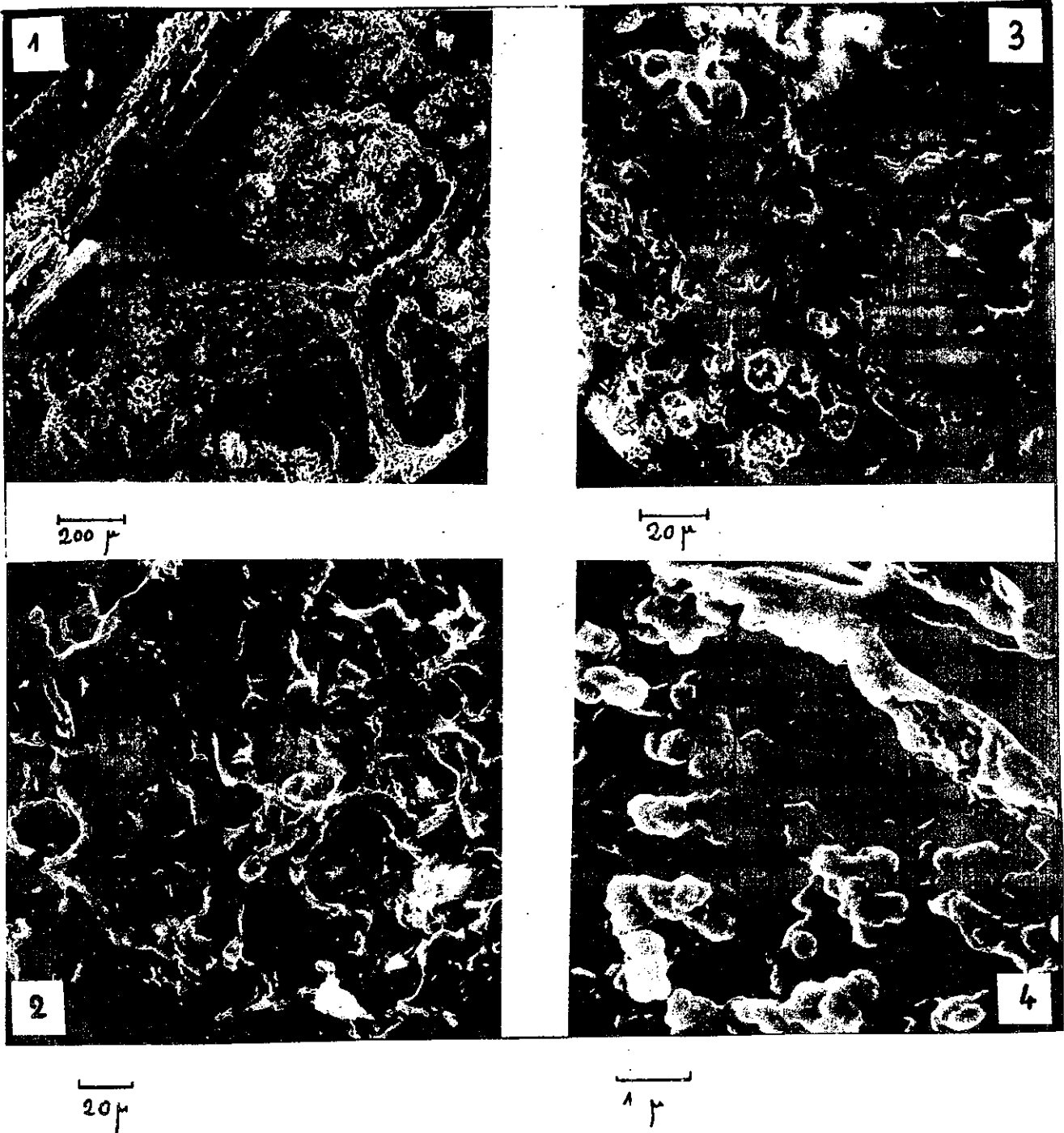
5.5.2 - Evolution morphologique et pondérale des litières test

Différents substrats ont été déposés en octobre 1983 et relevés, pour partie à la fin juin 1984, immédiatement après la fonte des neiges, et pour le restant en octobre 1984, sous la neige (les litières d'érable n'ont de ce fait pu être récupérées). Certains substrats (érable, rhododendron) ont été parallèlement déposés au début juillet 1984 et relevés en octobre, pour tester la biodégradation estivale.

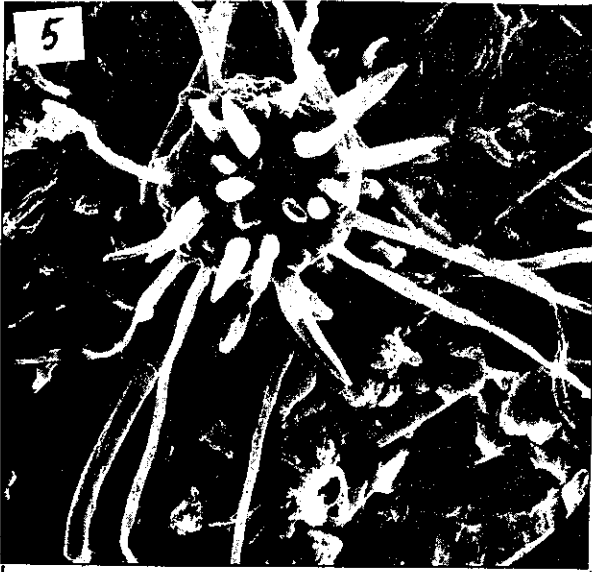
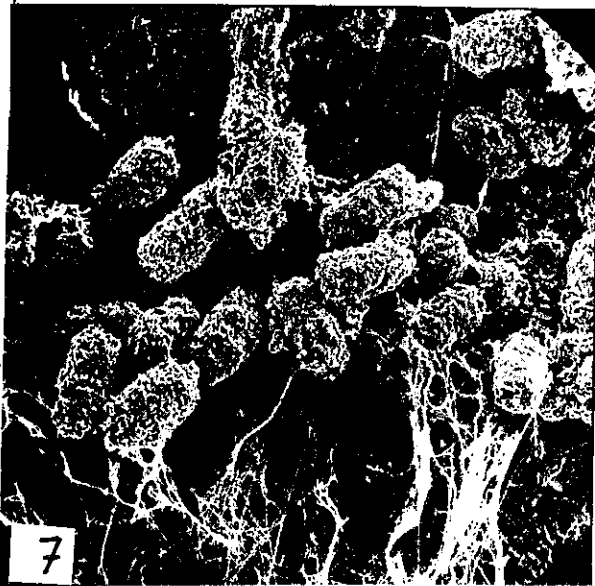
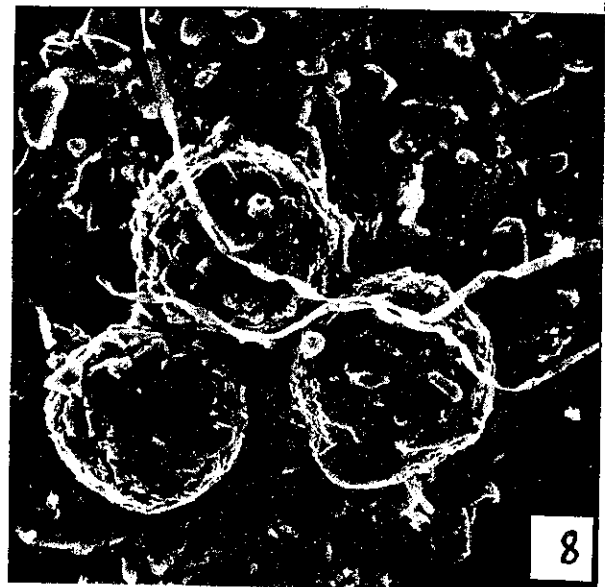
5.5.2.1 - Evolution morphologique

Observée à la loupe binoculaire, puis au microscope électronique à balayage, l'évolution morphologique des litières se caractérise par (Tableau 20) :

- Un noircissement généralisé associé à une colonisation rapide et intense d'hyphes mycéliens de couleur foncée. Mise à part les litières d'érable, toutes les litières sont enlacées dans un réseau dense d'hyphes liant les feuilles entre-elles. Au M.E.B., ces hyphes apparaissent souvent associés à des picnides (coelomycetes) et à des fructifications (en forme d'oursins) de champignons démâciés. Ces fructifications mélanisées, peu dégradables, pourraient être à l'origine de l'accumulation de granules noirs arrondis, observée en lame mince dans l'humus (Planche II).



- PLANCHE I - 1. Nivose : Litière décolorée et altérée de myrtille (vac. myrtillus) après incubation annuelle
2. Nivose : Détail de la photo 1 : cavités cellulaires vides
3. Lognan : Litière brune et altérée de myrtille après incubation annuelle
4. Lognan : Détail de la photo 3 granules arrondis dans les cavités cellulaires (polyphénols protéines ?)

10 μ 50 μ 200 μ 20 μ

- PLANCHE II - 5. Lognan : Litière de Rhododendron ; fructifications mélanisées de champignons démâciés
6. Lognan : Litière de Rhododendron : Coelomycète et fructifications de champignons démâciés
7. Lognan : Déjections holorganiques de diplopodes envahies par les hyphes mycéliens
8. Nivose : Déjections organominérales (ou habitats de théca-meubiens ?)

Substrat test	ERABLE		MYRTILLE		RHODOS feuilles vertes		PAPIER filtre	
	hiver	été	hiver	année	hiver	année	année	année
Période d'incubation								
Couleur du substrat	brun jaune foncé	brun foncé à beige	brun	brun rouge à gris foncé foncé	brun foncé	brun foncé	gris	
Maisons interfeuilles Rigidité	peu liées rigides	libres assez rigides	très liées rigides	très liées rigides	liées rigides	liées rigides	rigides	
Degré de salissure	moyen	faible	faible	élevé	faible	moyen	moyen	
% Surface disparue	faible	faible	assez élevé	élevé	nul	faible	faible	
Présence de déjections de la mésofaune	très faible	faible	faible	nombreuse	nulle	assez nombreuse	moyenne	
% Surface occupée par un mycelium blanchâtre	assez élevé	très élevé	moyen	faible	élevé	élevé		
% Surface occupée par un mycelium noirâtre	élevé	élevé	élevé	élevé	élevé	très élevé	élevé	
% Surface décolorée à translucide non recouverte par un mycelium	moyen	faible	très faible	faible	nul	nul		

Tableau 20 Evolution morphologique des différents
substrats test en fonction de la durée d'incubation

- Le développement intense de mycélium blanc sur certains substrats ne se traduit pas ou peu (érable) par une décoloration des feuilles. Observé au M.E.B., ce mycélium blanc s'est révélé être essentiellement formé d'ascomycètes, peu à même (TOUTAIN, 1981) de dégrader les produits bruns qui colorent les litières. Parallèlement, des granules arrondis assez semblables à ceux décrits par TOUTAIN (1981) comme étant des produits bruns polyphénols-protéiques, ont été mis en évidence au M.E.B. sur les parois cellulaires des litières brunes de myrtille (Planche I).

- Une activité de la faune inégalement répartie sur les litières, se traduisant par des perforations de taille et d'abondance variable et par des déjections généralement holorganiques.

5.5.2.2 - Evolution pondérale

La perte de poids des différents substrats, en fonction de la période d'incubation est présentée sur le tableau 21.

TABLEAU 21

Pertes de poids (%) des différents substrats lors de
l'incubation sur le terrain
(n) nombre de sachets récupérés

	hiver	été	année
Erable - - - - -	33 (4)	33	
Myrtille - - - - -	33		40 (5)
Carex - - - - -	34 (3)		50 (6)
Rhododendron			
feuilles vertes - - - -	20 (3)	17	31,5 (6)
Rhododendron			
litières de 6 mois - - -	8 (3)		16 (5)
Papiers filtres - - - -	37 (3)		40 (5)
Buchettes d'aulne - - - -			21 (6)

La dispersion des pertes de poids pour les différents sachets d'un même substrat relevés à la fin de l'hiver est très forte. On peut l'interpréter comme la conséquence d'une colonisation lente et hétérogène par la faune, déjà notée lors de l'observation morphologique. Cette dispersion ne demeure importante que pour les papiers filtres après une année d'incubation.

On peut classer les substrats par ordre "d'aptitude à la dégradation" :

Carex > Myrtille > Rhododendron (feuilles vertes)
>> Rhododendron (litière de six mois).
(la litière d'érable n'a pu être retrouvée).

Cette hiérarchie met en évidence le caractère résistant à la dégradation des litières de rhododendron et myrtilles qui forment l'essentiel de la production végétale dans cette station.

5.5.3 - Inventaire succinct de la faune du sol

Aucun lombric n'a pu être extrait du sol par arrosage au formaldéhyde dilué. L'extraction de la faune du sol pratiquée sur un horizon A₀ (L + F + H) prélevé en juillet 1985 par la méthode des entonnoirs de Berlese nous a fourni:

- Une population considérable de collemboles de petite taille répartis en une ou deux espèces.
- Une population assez abondante d'acariens avec une dominante d'oribates.
- Une population importante en nombre d'individus et dominante du point de vue de la biomasse, de diplopodes, auxquels on peut associer la présence des nombreuses déjections cylindriques holorganique d'environ 0,5 mm de longueur observées sur les litières tests.
- Quelques enchytréides et larves d'insectes.

Cette faune ingère essentiellement des débris végétaux (acariens, diplopodes) ou des hyphes mycéliens (collemboles). Les enchytréides, qui sont aptes à pratiquer une incorporation de la matière organique des litières, à la matière minérale, sont peu abondants. Cette spécialisation de la faune pourrait être à l'origine de la brutalité de la transition entre les horizons A_0 , très pauvres en matière minérale et les horizons A_2 à très faible teneur en matière organique.

5.5.4 - Conclusion à l'étude de la biodégradation

La biodégradation s'exerce à cet étage sur des litières particulièrement résistantes (myrtille et surtout rhododendron). La mésofaune relativement abondante de ces sols fragmente les débris végétaux, mais se révèle incapable de pratiquer un brassage organominéral. L'activité microbienne se traduit par un noircissement généralisé des litières lié à une colonisation très intense par des hyphes mycéliens mélanisés, dont certains organes (sclerotes ou fructifications) particulièrement résistants à la biodégradation s'accumulent dans l'humus. Ces différents facteurs favorisent l'accumulation de matière organique en surface.

5.6 - CONCLUSION A L'ETUDE DES SOLS DE LOGNAN

Les sols de cette station, située à l'étage subalpin sur le versant Nord-Est de la vallée, constituent un système complexe, organisé à différentes échelles, et présentent de nombreuses variations latérales liées à des gradients très divers (microclimat, végétation, pente, type de fourniture hydrique, durée de la pédogenèse).

L'étude stationnelle envisagée ici nous a cependant permis de mettre en évidence certains des grands traits du fonctionnement de ces sols :

- Un cycle biologique peu actif, s'effectuant essentiellement aux dépens des horizons supérieurs des sols et fournissant en surface une litière pauvre en azote et particulièrement résistante à la biodégradation. La mésofaune, relativement abondante, fragmente ces débris sans réaliser de brassage organominéral. L'activité de la microflore se manifeste par un noircissement généralisé des litières lié au développement très intense d'hyphes mycéliens mélanisés dont certains organes s'accumulent dans l'humus. Ces facteurs favorisent une accumulation d'humus brut en surface.

- Un mécanisme actif de podzolisation, marqué par des teneurs élevées en carbone, aluminium et dans une moindre mesure en fer dans les eaux lysimétriques, et confirmé par l'analyse des dépôts ultimes dans la porosité de l'horizon Bs. Les horizons supérieurs de ces sols constitueraient des milieux complexants pendant l'hiver et peu complexants pendant l'été, en relation avec la variation saisonnière de l'activité biologique. La lixiviation d'éléments minéraux, qui n'est pas ou très peu compensée par les remontées biologiques (végétation, mésofaune), se solde donc par des pertes nettes pour les horizons supérieurs.

- Un mécanisme secondaire d'hydromorphie, apparaissant sur la pente de la moraine sous l'effet d'une nappe temporaire dans l'horizon Bh. Ce phénomène résulte du colmatage par des dépôts minéraux et organométalliques de la porosité des horizons Bs.

La présence de sols de type pédogénétique identique (podzol) et de morphologie très proche dans des situations très différentes du point de vue de la fourniture hydrique, du pédoclimat et de la productivité, nous semble résulter de la multiplicité des facteurs en cause et de "compensations" entre facteurs.

En effet, les podzols situés sur les crêtes ventées, s'ils subissent une faible fourniture hydrique du fait du gel hivernal et de la forte évapotranspiration estivale, sont soumis à des remontées biologiques négligeables, du fait de la faiblesse de la productivité végétale et de l'enracinement très superficiel des plantes lié en particulier à l'induration très forte de l'horizon Bs. Ce sont par ailleurs, du fait de la stabilité de leur position, les sols les plus anciens.

Inversement, les podzols situés en bas de pente qui sont souvent plus meubles et plus profondément colonisés par les racines des plantes que ceux situés en crête, subissent des fournitures hydriques considérables à travers un enneigement cumulé et une circulation latérale profonde. Dans ces positions apparaissent des phénomènes d'hydromorphie temporaires qui favorisent la mobilisation du fer. La présence de podzols superposés, développés dans des matériaux d'apports successifs, traduit l'intensité de la podzolisation qui s'y manifeste.

6. LAVANCHER : SOL BRUN FAIBLEMENT OCREUX SUR COLLUVIONS DE PENTE, SOUS PESSIERE MONTAGNARDE

6.1 - PRESENTATION DE LA STATION

La station du Lavancher se situe, à 1200 m d'altitude, sur l'une des très fortes pentes (60 à 70 %) orientées au Nord-Ouest que l'on traverse lorsque l'on suit le chemin du Lavancher à Argentières. Cette pente est formée par des colluvions épais, en placage sur les terrains sédimentaires qui affleurent par endroits à cette altitude. Les sols sont en majorité bruns faiblement ocreux, avec une forte charge en dalles de schiste cristallin, orientées parallèlement à la pente. La profondeur à laquelle apparaissent les horizons ocreux ainsi que leur épaisseur est très variable.

La végétation est une pessière dense constituée d'épicéas âgés (> 100 ans), sous lesquels se développe un sous-bois clairsemé à myrtille. Dans les zones plus lumineuses, suite à des chablis ou à des coulées de neige, apparaissent des peuplements denses d'une graminée à larges feuilles (*Calamagrostis varia*).

Végétation de la station : <i>Picea excelsa</i>	5
<i>Sorbus aucuparia</i>	2
<i>Acer pseudoplatanus</i>	1
<i>Alnus viridis</i>	1
<i>Vaccinium myrtillus</i>	2
<i>Dryopteris linnaeana</i>	2
<i>Oxalis acetosella</i>	2
<i>Luzula sylvatica</i>	2
<i>Veronica latifolia</i>	1
<i>Prenanthes purpurea</i>	1
<i>Maianthemum bifolium</i>	2

6.2 - DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DU SOL DE REFERENCE

6.2.1 - Description du sol

0-3 cm	A ₀	mull-moder. Couche L (1 cm) constituée d'aiguilles d'épicéa brunes à noires peu fragmentées. Couche F, brun clair constituée d'un feutrage dense de débris d'aiguilles enveloppés par un mycelium blanc abondant. A sa base apparaissent des micro-agrégats arrondis bruns à noirs d'environ 1 mm.
3-15 cm	A ₁	brun foncé (7,5 YR 4/2 à sec). Horizon d'épaisseur variable (5-15 cm) sur-structure polyédrique subanguleuse peu nette, sous-structure micro-agrégée nette. La partie supérieure est essentiellement formée de micro-agrégats bruns foncés arrondis. Quelques graviers, quelques racines fines. Transition diffuse.
15-50 cm	B ₁	brun jaune coloré (10 YR 5/8 à sec) sur-structure polyédrique subanguleuse assez nette. Sous-structure micro-agrégée très nette. On observe quelques galeries de lombrics sur les parois desquelles se trouvent parfois des fragments d'aiguilles. Assez nombreux graviers. Nombreuses dalles de schiste cristallin orientées parallèlement à la pente. Quelques racines ligneuses.
50-80 cm	B ₂	brun jaune (10 YR 6/6). Très nombreux éléments grossiers cristallins de toute taille. Structure polyédrique subanguleuse à sous-structure micro-agrégée peu nette. Quelques racines ligneuses entre les éléments grossiers. Cet horizon n'apparaît nettement que dans certaines fosses. Il peut être remplacé par un horizon de couleur plus terne tout aussi graveleux, mais présentant souvent une structure lamellaire assez dense.

6.2.2 - Organisation de quelques constituants à l'échelle microscopique

Deux prélèvements effectués dans les horizons A₀/A₁ et B₁ du sol ont été imprégnés à sec dans la résine. Les lames minces correspondantes sont décrites succinctement ci-dessous ; elles n'ont pas fait l'objet d'analyses à la microsonde.

- Horizon A₀/A₁ - très nombreux débris d'aiguilles souvent dilacérés à l'intérieur desquelles on observe fréquemment, soit des grappes de micro-agrégats ovales holorganiques d'environ 50-100 µm, soit des micro-agrégats anguleux allongés souvent jointifs d'environ 20-50 µm. Entre les aiguilles on observe : des agrégats cylindriques d'environ 500 µm constitués de fragments végétaux peu transformés (birefringents), et de gros agrégats arrondis souvent fissurés dans lesquels la matière minérale est dominante, mais incluant de nombreux fragments végétaux de taille variable, peu transformés (fragments d'aiguilles).
- Horizon B₁ - fond matriciel divisé en agrégats arrondis d'environ 1-3 mm à limite nette, en entassement lâche. Les agrégats les plus fins sont peu poreux. Les plus gros présentent d'assez nombreux chenaux biologiques tortueux à bords lisses. Plasma brun clair sepique abondant, nombreux grains de squelette sans orientation particulière, nombreuses lithoreliques de gneiss de toute taille emballés dans le plasma.

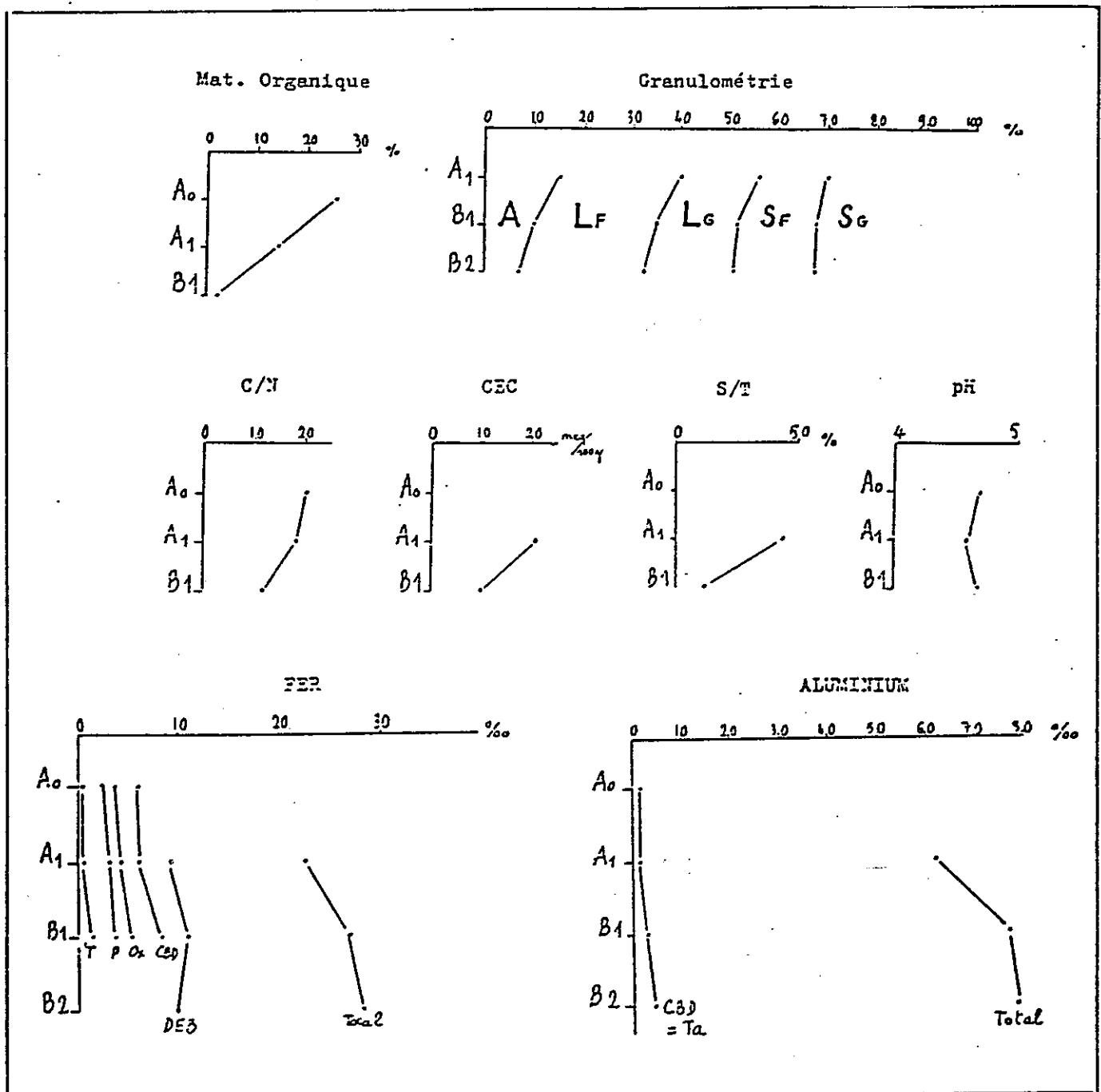
Interprétation

L'observation microscopique de ces horizons met en évidence une forte activité de la mésofaune.

6.2.3 - Données analytiques

6.2.3.1 - Caractères généraux

La texture du sol est limono-sableuse. Le pourcentage d'argile augmente de B₂ en A₁ aux dépens des limons grossiers et des sables. Le pourcentage de matière organique en surface est moins élevé que celui qu'avait pu laisser prévoir la simple observation de l'horizon sur le terrain. Ces remontées de matière minérale en surface peuvent être attribuées à la mésofaune, comme nous avons pu le vérifier en lame mince. La teneur en matière organique qui reste élevée en A₁ diminue fortement en B. Le rapport C/N, élevé en A₀ et A₁, traduit l'influence de la litière d'épicéa,



T: Tétraborate Na CED: méthode Mehra Jackson
 P: Pyrophosphate Na DEB: méthode Deb Arras
 Ox: méthode Tamm Ta: méthode Tamm Arras

Fig. 39: Caractères analytiques généraux du sol brun légèrement ocreux du lavancher

réputée difficilement dégradable. La capacité d'échange est assez élevée en A_1 (20 meq). Son taux de saturation, voisin de 50 % traduit l'importance des restitutions en surface par le cycle biologique. La CEC et surtout le taux de saturation chutent fortement en B_1 . Le pH est stable (4,7) de l'horizon A_0 à l'horizon B_1 .

6.2.3.2 - Evolution des formes du fer et de l'aluminium

Calculées sur la terre fine (< 2 mm), les teneurs en fer et aluminium total sont nettement plus faibles en A_1 qu'en B. Ramenées à la matière minérale, cette différence est cependant faible. On observe une légère augmentation des teneurs en fer et aluminium amorphe organique de l'horizon A_1 à l'horizon B_1 qui se poursuit jusqu'en B_2 pour l'aluminium. Cette évolution pourrait témoigner d'une faible redistribution du fer et de l'aluminium. Elle confère au sol son caractère faiblement ocreux.

6.2.3.3 - Interprétation

L'étude morphologique et analytique du sol met en évidence deux des caractères principaux du sol :

- une forte activité biologique. Elle est à l'origine d'un brassage organominéral des horizons superficiels et d'une forte resaturation de la capacité d'échange en surface
- une faible augmentation du taux de fer et d'aluminium "libre" en B qui lui confère son caractère faiblement ocreux.

6.3 - PEDOCLIMAT

6.3.1 - Introduction

Le climat de cette station de basse altitude est marqué par quatre saisons distinctes : pendant environ quatre mois

d'hiver (janvier à avril), le sol est enneigé. La neige représente une hauteur d'eau équivalente au tiers environ des précipitations annuelles. Le printemps est court et humide. Les chutes de neige sont encore fréquentes. L'ensoleillement est limité par l'orientation au Nord-Ouest et par la position en pente forte, proche du fond de vallée de la station. Les deux mois d'été (juillet et août) se distinguent nettement par des températures générales plus élevées. Une légère sécheresse est apparue l'année de notre étude. L'automne est par contre une saison longue. Après les fortes précipitations de septembre apparaît généralement une période plus clémente, entre les mois d'octobre et de novembre. L'ensoleillement n'atteint cependant plus la station, le massif du Mont-Blanc jouant le rôle d'écran. Plusieurs petites chutes de neige suivies de fontes rapides, se produisent avant l'installation définitive, généralement fin décembre, du manteau neigeux hivernal.

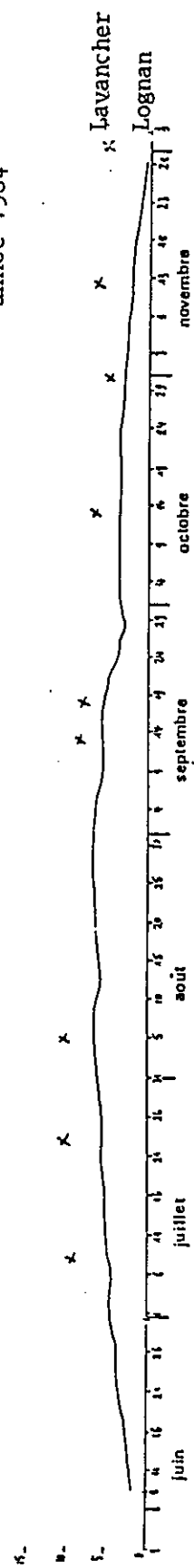
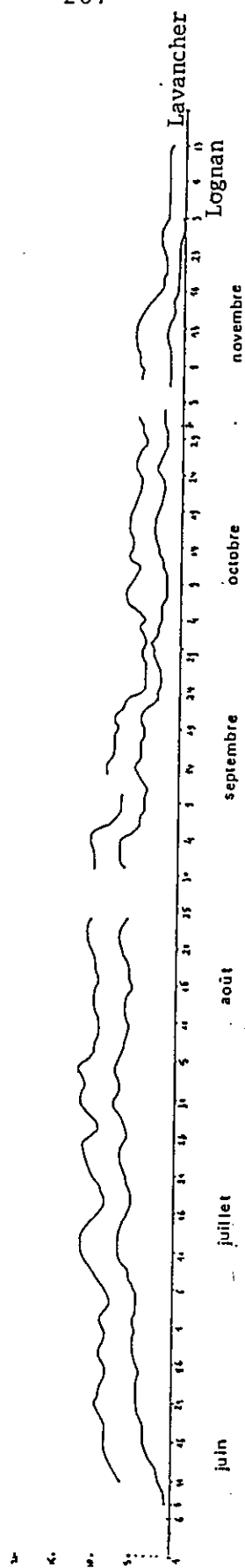
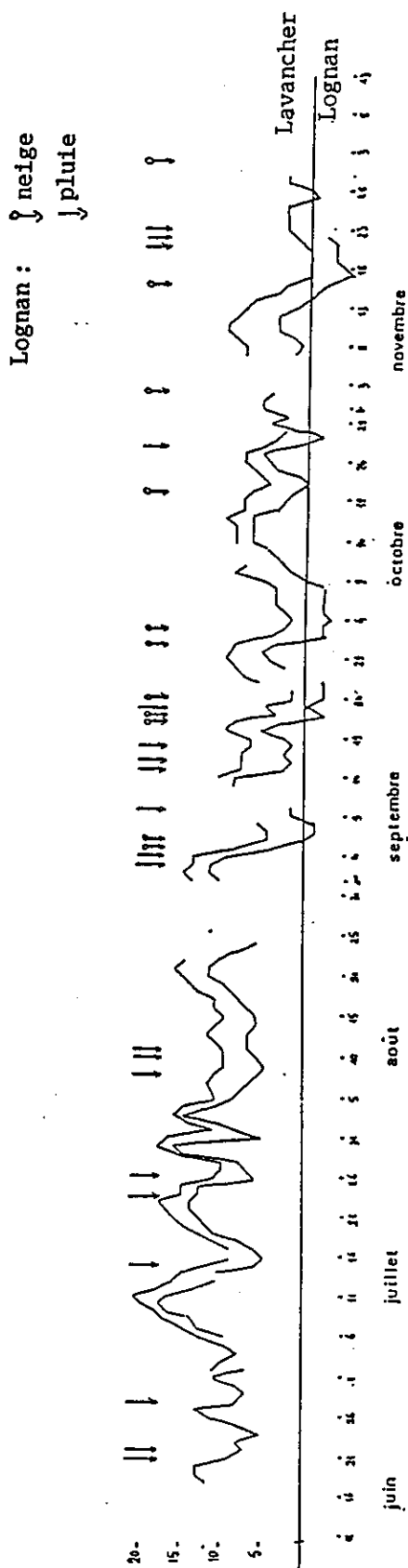
6.3.2 - Régime thermique

Le régime thermique de la station est présenté par comparaison avec celui mesuré à l'étage subalpin dans la station de Lognan.

Température de l'air à 10 cm au-dessus du sol (Fig.40)

* La température au Lavancher est en moyenne de 3 à 4°C supérieure à celle mesurée à Lognan pendant la période considérée (absence de neige à Lognan), ce qui correspond approximativement aux gradients macroclimatiques (0,5°C/100 m).

* L'amplitude maximale journalière est inférieure au Lavancher (13,5°C) par rapport à Lognan (18°C). Les maximas journaliers s'observent en juillet vers 19 heures au Lavancher et vers 16 heures à Lognan. En octobre, ils apparaissent vers 16 heures au Lavancher et vers 14 heures à Lognan.



* Les pics de température au Lavancher se produisent le plus souvent un jour après ceux observés à Lognan. Les minimas sont beaucoup plus accentués à Lognan qu'au Lavancher.

* Les précipitations liquides semblent moins affecter la température au Lavancher qu'à Lognan. Cependant, elles n'entraînent pas obligatoirement de baisse importante de température.

Interprétation

La température de l'air à 10 cm au-dessus du sol est nettement plus élevée et plus tamponnée au Lavancher qu'à Lognan. Cette différence est liée à la position de la station en fond de vallée et à l'action du couvert forestier.

Température dans le sol (Fig.41 et 42)

à - 10 cm * La température moyenne journalière au Lavancher est de 3 à 5°C supérieure à celle mesurée à Lognan.

* L'amplitude maximale journalière est de 1,5°C au Lavancher contre 1°C à Lognan. Les maxima journaliers s'observent dans les deux stations vers 22 heures en juillet et 20 heures en octobre.

* Sur la figure 41, les maxima de la courbe sont plus aigus au Lavancher et plus aplatis et étalés sur plusieurs jours à Lognan. Le début des maxima "aplatis" à Lognan correspond aux maxima de la température dans l'air ; la suite du plateau de la courbe correspond à une chute de la température de l'air.

à - 40 cm * Les mesures ponctuelles effectuées à -40 cm au Lavancher donnent des valeurs toujours inférieures ou égales à celles mesurées à -10 cm, contrairement à Lognan où les températures en

profondeur sont souvent supérieures à celles observées à -10 cm.

Interprétation

La température moyenne du sol est plus élevée au Lavancher. Les fluctuations thermiques de l'atmosphère se propagent plus rapidement et plus profondément dans le sol au Lavancher qu'à Lognan, du fait de la meilleure conductivité thermique du sol.

6.3.3 - Régime hydrique

La pluviométrie moyenne à Chamonix se monte à 1260 mm. On peut l'estimer à 1300 mm au Lavancher, dont environ le tiers sous forme de neige. Cependant, le couvert végétal dense intercepte une forte proportion des précipitations : AUSSENAC (1980) a mesuré sur une plantation d'épicéa dans les Ardennes, une interception de 34 % des précipitations par le feuillage dont seulement 2 % d'écoulement le long des troncs. De plus, la pente abrupte (60 %) réduit les apports au m² de sol. Très faible pendant l'hiver, l'évapotranspiration des épicéas s'élève dès la fonte des neiges, lors de l'augmentation générale des températures. Elle s'exerce à travers un enracinement profond, aux dépens de l'ensemble du sol.

Les teneurs en eau ont été mesurées lors de prélèvements périodiques, l'homogénéité des sols à faible profondeur permettant une bonne reproductibilité des mesures. Une sélection est présentée sur la figure 43.

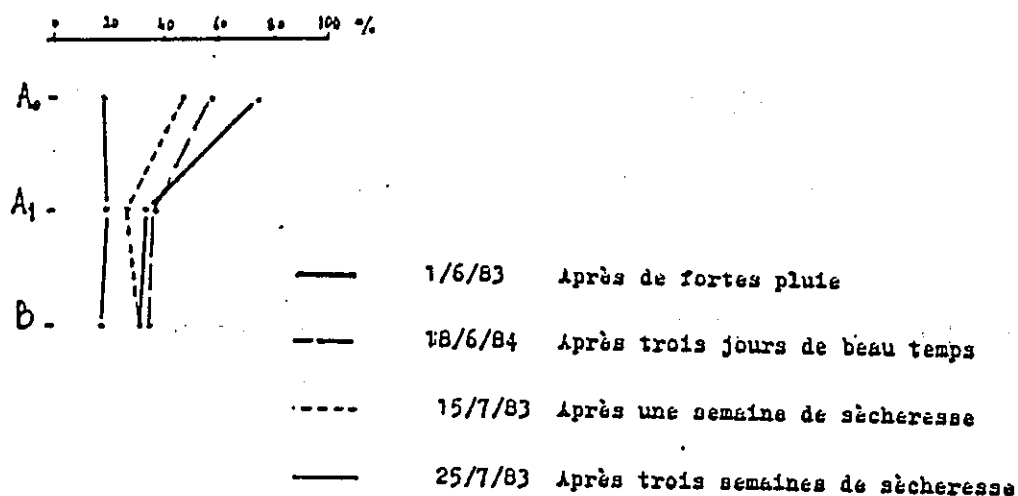


Fig.43 - Présentation de quelques profils hydriques caractéristiques

Les teneurs varient peu mis à part en surface où la litière d'épicéa est à même d'absorber de forts volumes d'eau.

Ni la fonte des neiges, qui se fait très lentement, étant donné l'absence totale d'ensoleillement sur la station à cette époque (avril), ni les fortes précipitations estivales, dont l'intensité est amoindrie par le couvert forestier, ne provoquent de ruissellement en surface ou de stagnation d'eau dans les fosses pédologiques laissées ouvertes. Ces sols absorbent et redistribuent rapidement en profondeur les précipitations. Le nombre relativement élevé de prélèvements d'eau gravitaire effectués à partir de lysimètres implantés en surface, en est une conséquence.

Interprétation

La teneur en eau des sols varie notablement en surface, mais peu en profondeur. Protégé par un couvert forestier dense, le sol draine rapidement les précipitations nombreuses, mais de relativement faible intensité qui

l'affectent. Une grande partie de ces précipitations est recyclée par la forêt.

6.3.4 - Conclusion à l'étude du pédoclimat

Le pédoclimat de la station est déterminé par sa position géographique et topographique et par l'influence du couvert forestier. Les fluctuations thermiques sont faibles dans l'air et dans le sol. Les précipitations de relativement faible intensité qui atteignent le sol, ne provoquent de fortes fluctuations des teneurs en eau qu'en surface. Une grande partie des précipitations est recyclée par la végétation.

6.4 - ETUDE DU FONCTIONNEMENT BIOGEOCHIMIQUE

6.4.1 - Etude lysimétrique

6.4.1.1 - Origine et domaine de validité des données

Six lysimètres ont été implantés pendant l'été 1983, à partir de quatre tranchées creusées sur une pente très forte (60 à 70 %).

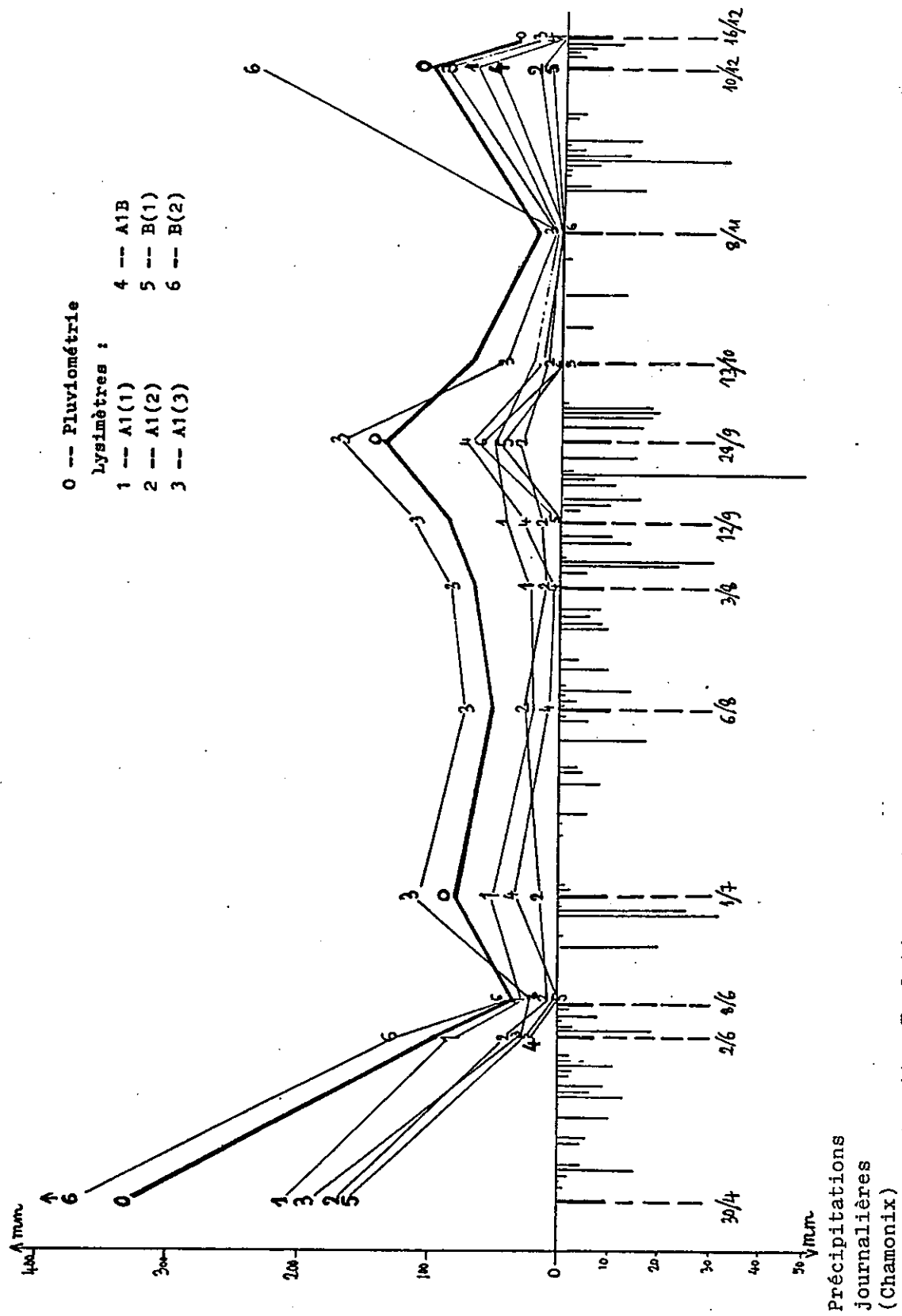
Deux tailles de lysimètres ont été utilisés : 45 et 60 cm de longueur, ce qui correspond à des surfaces ouvertes de 540 et 720 cm².

- Trois lysimètres à la base de l'horizon A₁ à 10 cm de profondeur. Ils sont notés A₁(1)(S = 720 cm²), A₁(2)(S = 720 cm²) et A₁(3)(S = 540 cm²).

- Un lysimètre à la transition A₁B(S = 540 cm²).

- Deux lysimètres dans l'horizon B, l'un à 30 cm de profondeur, B(1)(S = 540 cm²), et l'autre à 45 cm de profondeur, B(2)(S = 540 cm²).

La taille des lysimètres étant différente, nous avons ramené les volumes obtenus pour chaque lysimètre à sa surface d'ouverture de façon à pouvoir les comparer. L'évolution des précipitations à Chamonix et des hauteurs d'eau équivalentes drainées lors des différentes séquences pluvieuses par chaque lysimètre est représentée sur la figure 44.



- Quatre lysimètres $A_1(1)$, $A_1(2)$ et $B(1)$ nous ont fourni des hauteurs d'eau assez semblables et dont les fluctuations au cours du temps suivent approximativement celles des précipitations. Leurs valeurs sont inférieures à celles des précipitations enregistrées à Chamonix, ce qui est logique, étant donné la forte interception des précipitations par les arbres de la station.

- Un lysimètre $B(2)$ a drainé des hauteurs d'eau systématiquement supérieures à celles des précipitations, sauf pendant la période estivale, où il n'a pas fourni d'eau. Il a donc bénéficié d'une circulation préférentielle dans le sol. L'abondance des dalles de schiste cristallin parallèles à la pente peut être à l'origine de telles concentrations d'eau.

- Un lysimètre $A_1(3)$ a drainé des hauteurs d'eau inférieures aux précipitations pendant l'hiver et jusqu'au 8/6, puis des hauteurs d'eau nettement supérieures aux précipitations pendant l'été. Ce type de comportement ne peut être expliqué que par la création au cours de l'année (par la faune?) d'une porosité, laquelle aura permis des écoulements préférentiels en direction du lysimètre.

Par ailleurs, les lysimètres situés dans l'horizon B n'ont pas fourni d'eau pendant la période estivale (8/6 au 12/9).

Afin d'alléger la présentation, seules les données concernant les lysimètres $A_1(2)$, A_1B , $B(1)$ et $B(2)$ sont présentées dans le texte. Les autres sont données en annexe. Par contre, les commentaires tiennent compte de l'ensemble des données. Les valeurs moyennes calculées sur des dates où tous les lysimètres ont fonctionné sont présentées sur le tableau 22.

6.4.1.2 - Analyse des fluctuations saisonnières

- Horizon A_1 - (Fig.45)

Les valeurs moyennes des concentrations dans les eaux provenant des trois lysimètres situés dans l'horizon A_1 sont proches. Les concentrations les plus faibles correspondent au lysimètre ayant drainé les plus forts volumes.

stat	gout	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	NO3	NH4	C
Lavanch	I_A11	1.502	0.918	2.151	0.503	0.535	0.182	0.021	0.255	0.124	0.043	13.088
Lavanch	I_A12	2.234	0.703	1.990	0.588	0.468	0.094	0.056	0.212	0.986	0.063	10.273
Lavanch	I_A13	1.171	0.353	1.840	0.472	0.315	0.035	0.005	0.155	0.160	0.010	7.160
Lavanch	I_A1B	5.208	1.860	7.805	0.929	1.540	0.279	0.037	0.580	0.063	0.090	37.498
Lavanch	I_B1	1.896	1.233	2.571	0.792	0.881	0.091	0.087	0.258	0.039	0.091	15.798
Lavanch	I_B2	1.072	0.710	0.599	0.604	0.322	0.000	0.002	0.257	0.000	0.000	8.298

Tableau 22 : Valeurs moyennes des concentrations
calculées à partir des dates où tous
les lysimètres ont fonctionné
(2/6, 8/6, 12/9, 25/9, 13/10, 10/12).

- Cations métalliques - Calcium et potassium sont présents en fortes concentrations et fluctuent parallèlement : ils présentent un premier maximum pendant la sécheresse estivale et un maximum secondaire en fin d'année.
- Les teneurs en sodium et magnésium sont plus faibles. Leurs fluctuations sont parallèles à celles du calcium et potassium, mais fortement atténuées.
 - Les concentrations en aluminium sont comprises entre 0,3 et 0,5 ppm et varient peu au cours de l'année. Le silicium est présent en faible concentration excepté un maximum marqué en fin d'automne (16/12).
 - Les concentrations en fer et surtout en manganèse sont très faibles.
- Carbone, Azote, pH - Le carbone présente un maximum estival peu prononcé. Ses fluctuations sont faibles et ne sont pas directement associées à celles de l'aluminium ou du pH.
- Le nitrate n'apparaît que dans certains lysimètres et toujours en faible concentration. Ses fluctuations, de faible amplitude, ne sont pas simplement corrélées à celles des bases et de celles de l'aluminium.
 - Le pH subit de fortes fluctuations avec un minimum estival, un second minimum après la période humide du début octobre, et des maxima de début et fin d'année. Ses fluctuations sont inversement corrélées à celles de l'aluminium.

Interprétation

Les eaux gravitaires prélevées à la base de l'horizon A₁ se caractérisent par des teneurs relativement élevées en bases et par de fortes fluctuations saisonnières, que l'on peut associer à des phénomènes de dilution-concentration ou à l'action des cycles biologiques (nitrification, apports par des litières). A l'inverse, les fluctuations de l'aluminium sont faibles et sans relation simple avec l'un de ces phénomènes en particulier.

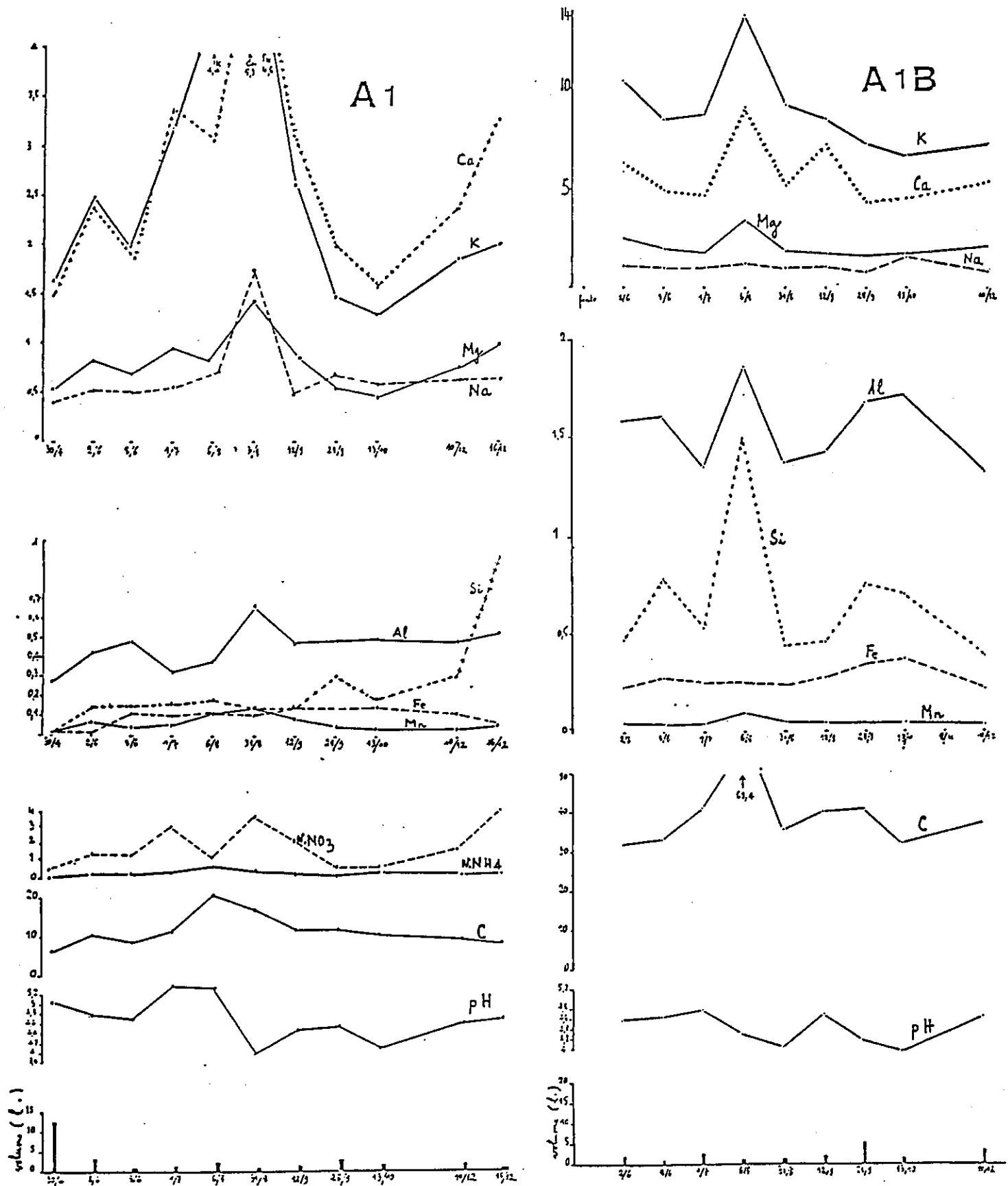


Fig. 45 Illustrations saisonnières des volumes (litres) drainés, du pH et des concentrations (ppm) des eaux gravitaires. Lavancher, lysimètres A₁(2) et A₁B

B1 -30cm

B1 -45cm

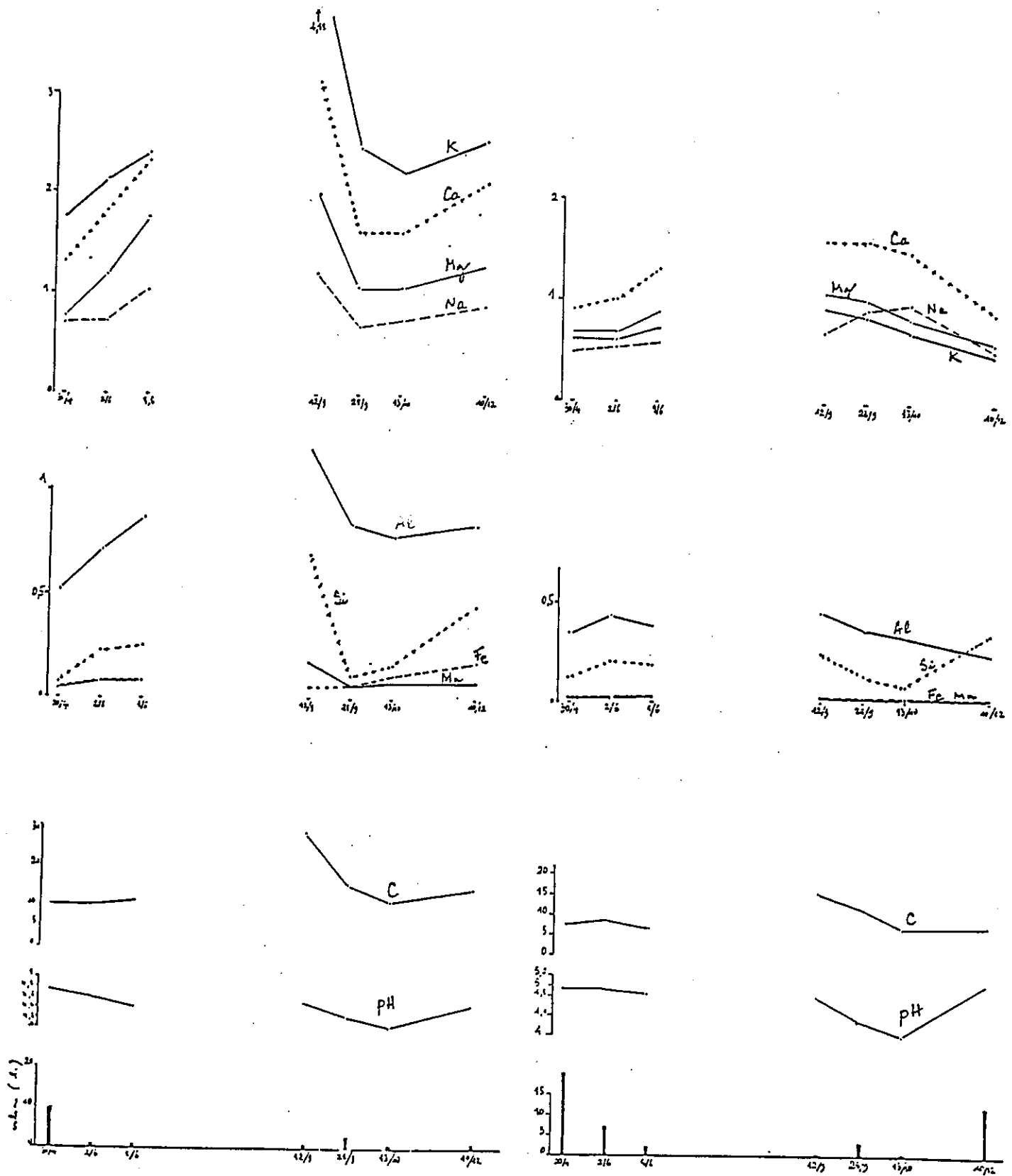


Fig. 46 : Fluctuations saisonnières des volumes (litres), du pH et des concentrations (ppm) des eaux gravitaires.
Lavancher, lysimètres B(1) et B(2)

- Horizon A₁B - (Fig.45)

Cations métalliques - Les teneurs en tous les éléments mis à part le fer et le manganèse sont 2 à 3 fois plus élevées qu'en A₁. Les fluctuations saisonnières des bases sont moins marquées qu'en A₀. Par contre, aluminium et surtout silicium subissent de fortes fluctuations parallèles.

Carbone, pH - Les teneurs en carbone sont très élevées et fluctuent parallèlement à celles des autres éléments. Les fluctuations du pH sont identiques à celles observées en A₁.

Interprétation

Les volumes ou les hauteurs d'eau équivalentes obtenues à partir de ce lysimètre sont faibles. Cependant, ils sont plus élevés pour certaines périodes que d'autres issus de lysimètres implantés en A₁ (A₁(2) ou en B (B(1)). Par ailleurs, les fluctuations saisonnières de concentration, bien que faibles, sont intermédiaires entre celles décrites en A₁, qui concernaient surtout les bases, et celles de l'horizon B₁ qui touchent aussi le silicium et l'aluminium. En conséquence, les fortes concentrations mesurées dans les eaux recueillies par ce lysimètre, nous semble plutôt le produit d'une hétérogénéité locale du sol que d'un artéfact.

- Horizon B₁ (-30 cm) (Fig.46)

La sécheresse estivale se traduit par un nombre réduit de données.

Cations métalliques - Les fluctuations des teneurs en calcium, potassium, magnésium et sodium sont parallèles et fortement marquées par la sécheresse estivale. Les minima apparaissent à la fonte des neiges, et lors des fortes précipitations automnales.

- L'aluminium et le silicium subissent des fluctuations identiques, les teneurs en aluminium étant inférieures à celles mesurées en A_1 (B), mais supérieures à celles mesurées en A_1 .
- Le fer et le manganèse sont présents en faibles concentrations.

- Carbone, Azote, pH
- Les teneurs en carbone sont intermédiaires entre celles observées en A_1 et en A_1 (B), et fluctuent parallèlement à celles des bases et de l'aluminium.
 - L'azote minéral n'est pas dosable.
 - Les fluctuations du pH sont faibles et présentent de même qu'en A_1 , un minimum après les fortes pluies de septembre, correspondant à un minimum en carbone et cations métalliques.

Interprétation

Les teneurs sont intermédiaires entre celles observées dans les horizons A_1 et A_1B . L'aluminium est toujours fortement mobilisé parallèlement au carbone et au silicium. Les fluctuations parallèles du silicium et de l'aluminium particulièrement nettes pour les horizons A_1B et B pourrait traduire la présence de composés amorphes de très petite taille (à 0,01 μm). Le compartiment gravitaire n'est pas fonctionnel pendant la quasi-totalité de l'été.

- Horizon B_1 (-45 cm) -

- Cations métalliques
- Les teneurs en cations diminuent fortement par rapport à celles enregistrées 15 cm plus haut dans le même horizon.
 - Cette chute de concentration affecte particulièrement le potassium, mais aussi le magnésium et le calcium. Les teneurs en sodium apparaissent peu modifiées.
 - Les teneurs en aluminium chutent parallèlement aux teneurs en carbone. Celles en silicium sont peu modifiées. Le fer n'est plus dosable.

Carbone et pH

- Les fluctuations observées sont identiques à celles enregistrées à la partie supérieure de l'horizon.

Interprétation

L'évolution présentée se traduit par une baisse générale des concentrations en solution. Cette baisse affecte particulièrement le potassium mais aussi le fer qui s'insolubilise totalement. Des concentrations non négligeables de carbone et d'aluminium demeurent cependant en solution. Cette baisse de concentration peut être mise en relation avec les forts volumes d'eaux obtenus à partir de ce lysimètre, en particulier, par rapport au précédent B_1 . Cependant, d'une part, elle n'affecte pas tous les cations dans la même proportion, et d'autre part, les concentrations demeurent faibles, même pour de faibles volumes d'eau (12/9, 13/10). Il s'agit donc bien d'un effet dû à l'horizon et non d'un simple facteur de dilution.

6.4.1.3 - Interprétation générale

La mobilisation des éléments augmente de l'horizon A_1 vers l'horizon A_1B , puis diminue progressivement au fur et à mesure que les solutions pénètrent profondément dans l'horizon B. Le fer, présent en faible concentration, migre jusque dans l'horizon B_1 où il s'insolubilise. L'aluminium et le carbone présents en fortes concentrations dans les horizons supérieurs, migrent profondément à travers l'horizon B.

Cette migration de fer et d'aluminium associée à celle de matière organique, au-delà de l'horizon A_1 est généralement considérée comme caractéristique de la podzolisation. Nous n'avons cependant pas mis en évidence de liaison entre carbone et aluminium.

Les teneurs en bases et particulièrement en calcium et potassium sont élevées, ce qui peut être mis en relation avec la forte productivité et l'intense activité biologique

de la pessière. Leurs fluctuations saisonnières sont engendrées par les variations climatiques (sécheresse estivale) et, à la partie supérieure du profil, par les restitutions d'éléments lors de la chute des feuilles automnales.

6.4.2 - Etude expérimentale de l'évolution in situ de vermiculites test

Des sachets de vermiculite ont été implantés par paires   -3 cm, -10 cm et -30 cm dans les sols en octobre 1983. Un sachet sur deux a été retiré du sol à la fin juin 1984, le restant en novembre 1984.

6.4.2.1 - Evolution chimique (Fig.47)

- Horizon A₀ -

Hiver + printemps	- stabilité de la CEC en relation avec une très faible fixation d'Al échangeable
	- très faible désaturation en baryum
année	- augmentation notable de la CEC liée à une réduction de l'aluminium "libre", au bénéfice du calcium et du magnésium

- Horizon A₁ -

Hiver + printemps	- augmentation faible de la CEC en relation avec la stabilité de la teneur en Al libre
	- augmentation sensible des cations du cycle biologique (Ca, Mg, K et Mn)
année	- augmentation faible de la CEC pour une teneur en Al libre stable
	- forte réduction du manganèse

- Horizon B -

année	- légère augmentation de la CEC et de l'Al libre
	- augmentation forte des cations du cycle biologique

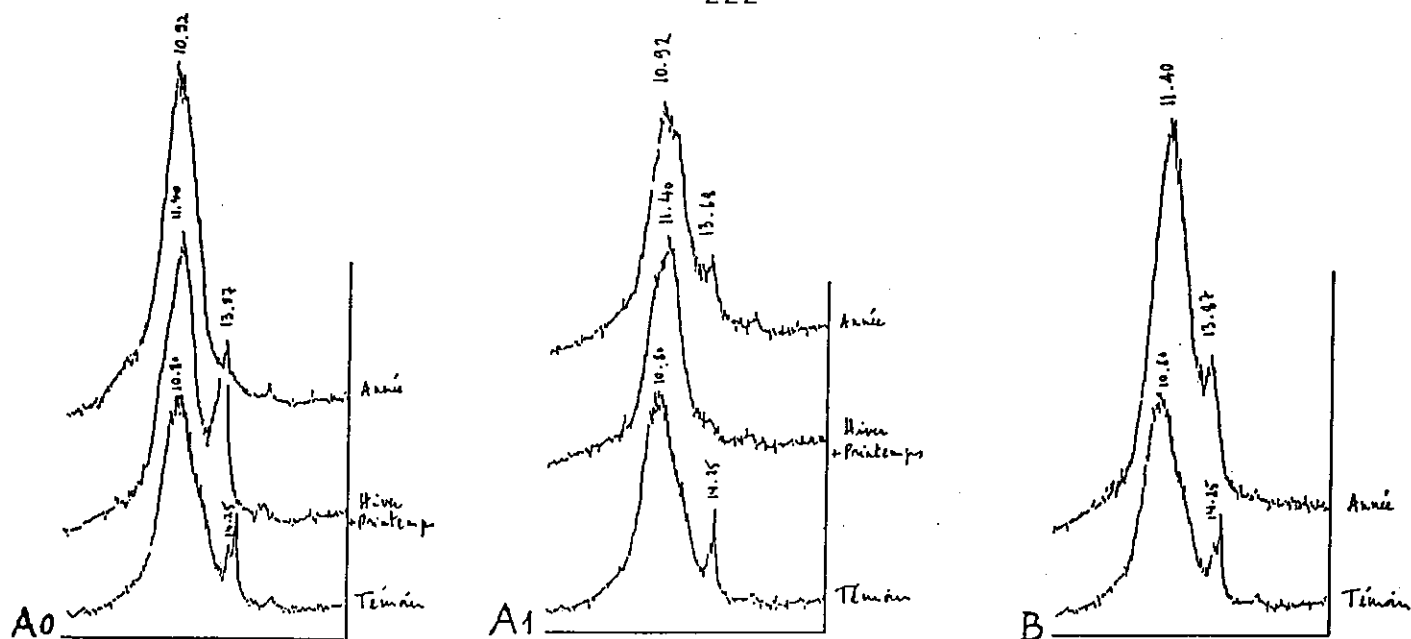


Fig. 48 : Evolution minéralogique des vermiculites (après traitement KCl) en fonction de la durée de séjour dans les horizons du sol

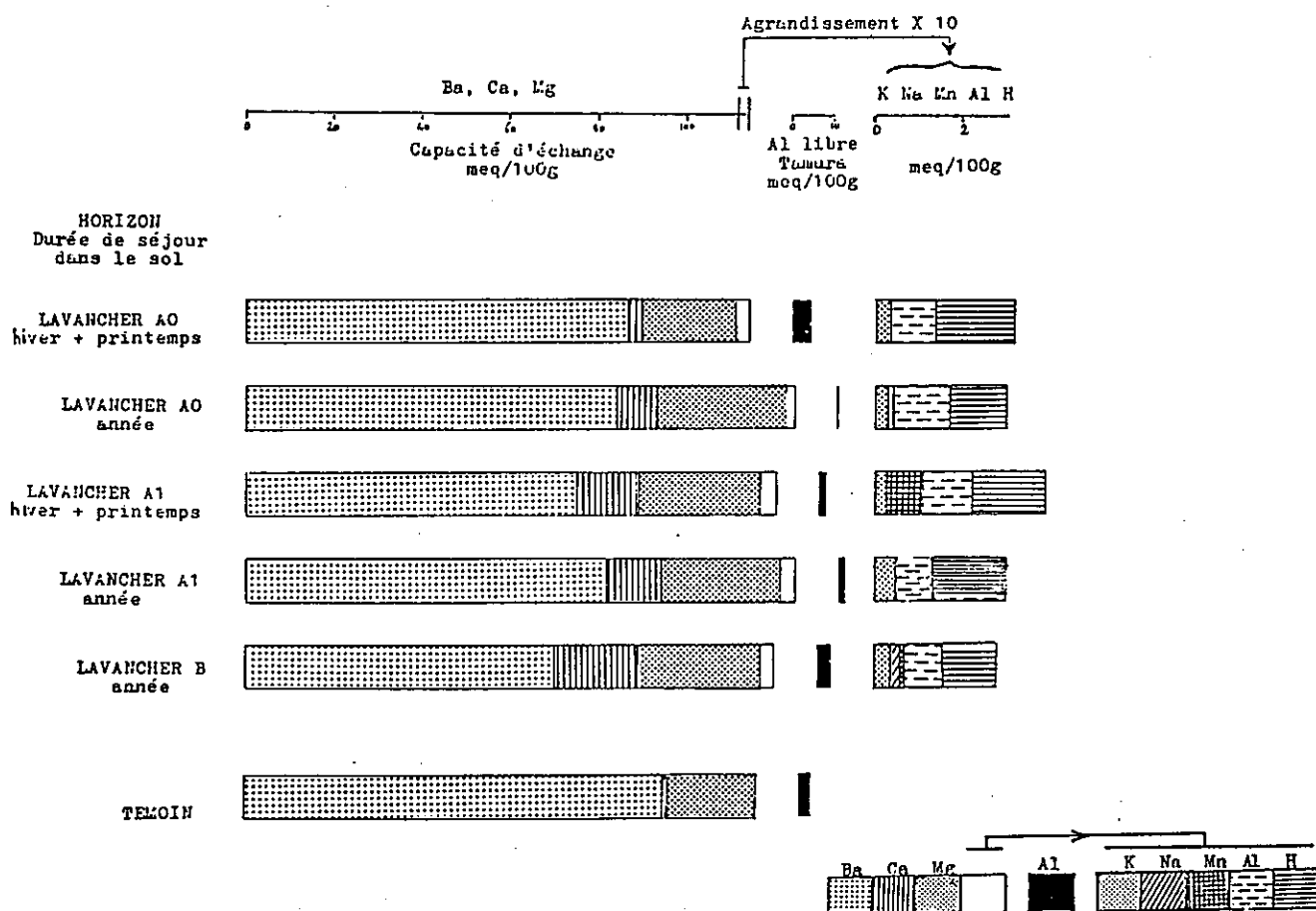


Fig. 47 : Evolution de la CEC, de l'aluminium "libre" et des cations échangeables en fonction de la durée de séjour des vermiculites dans les horizons du sol

6.4.2.2 - Evolution minéralogique (Fig.48)

Après saturation potassique :

- Horizon A₀ -

Hiver + printemps	- pic large à 11,40 A et pic étroit à 13,87 A de taille équivalente
année	- pic large à 10,92 A - petit pic à 13,87 A

- Horizon A₁ -

Hiver + printemps	- pic large à 11,40 A
année	- pic large à 10,92 A, épaulement marqué à 13,68 A

- Horizon B -

année	- pic large à 11,40 A, épaulement marqué à 13,87 A

Après traitement Tamura et saturation potassique, tous les diffractogrammes ne présentent plus qu'un pic à 10,06 A.

6.4.2.3 - Interprétation

L'évolution se traduit pour tous les échantillons par une augmentation notable de la capacité d'échange, l'aluminium libre restant constant ou même diminuant : elle caractérise donc un milieu complexant jusque dans la partie supérieure de l'horizon B₁. La date de ramassage des premiers échantillons (deux mois après la fonte des neiges) ne favorise pas l'expression d'une dynamique hivernale distincte.

L'augmentation de la capacité d'échange de vermiculites test placées sous des litières d'épicéa a déjà été décrite par RANGER (1985). Par contre, l'augmentation de la CEC dans les horizons inférieurs (A₁ et B₁), qui témoignerait de conditions complexantes, s'oppose au comportement généralement mis en évidence par ces auteurs dans les sols bruns.

(fixation d'aluminium et réduction de la capacité d'échange)
L'absence de références concernant des incubations de durée aussi courtes que celle de notre étude, ne nous permet pas de savoir si cette évolution résulte d'un artéfact ou des caractères réels du sol.

6.4.3 - Fonctionnement géochimique du sol et morphologie du profil

L'étude morphologique et analytique du profil montre :

- Une forte activité biologique de la station
- Une teneur légèrement plus élevée en fer et aluminium "libre" de l'horizon B par rapport à l'horizon A₁.

L'étude lysimétrique indique :

- Une migration en concentrations relativement élevées de carbone et d'aluminium et à des concentrations plus faibles de fer, des horizons supérieurs, du profil (A₀, A₁, A₁B) vers l'horizon B₁ où le fer et une partie du carbone et de l'aluminium s'insolubilisent, et B₂.
- Des teneurs élevées en "bases" dans les eaux gravitaires des horizons supérieurs, particulièrement lors de la période estivale et de la chute des feuilles.

L'évolution saisonnière des vermiculites indique :

- Des conditions de milieu complexantes quelle que soit la saison jusqu'à la partie supérieure de l'horizon B₁.

Ces résultats sont convergents dans leurs grandes lignes en ce qui concerne l'importance de l'activité

biologique et la présence d'une migration de fer et d'aluminium. Cependant, l'intensité de ces migrations, associées à la présence d'un milieu complexant contredit apparemment le faible degré de différenciation du profil. Pour lever cette contradiction entre morphologie et fonctionnement du sol, il nous faut d'une part, estimer l'importance face au drainage profond du recyclage biologique des éléments minéraux (§ 6.4.4), et d'autre part, revenir à la situation de ces sols dans le paysage (chapitre II). En effet, les vastes surfaces occupées par ces sols peu différenciés sur les fortes pentes de l'étage montagnard sont périodiquement affectées par les avalanches. La faible différenciation morphologique des profils pourrait résulter en partie de ces remaniements. Cette interprétation confirmerait les observations minéralogiques de ROBERT (1979) et PELISSONNIER (1978) qui concluaient à la généralisation, au niveau des processus, de la podzolisation dans la vallée de Chamonix.

6.4.4 - Relations entre le cycle biologique et le fonctionnement géochimique du sol

Les aiguilles d'épicéa forment l'essentiel de la litière de la pessière (AUSSENAC, 1972). Nous n'avons pas mesuré le poids de litière produit par unité de surface par les épicéas. On peut l'estimer à partir de données de la littérature (COLE et RAPP, 1980) à environ $300 \text{ g/m}^2/\text{an}$.

Les chutes de litière se produisent principalement au printemps, où elles sont augmentées de celles tombées sur la neige pendant l'hiver et restituées au sol lors de la fonte, et en automne. L'absence d'accumulation importante de débris végétaux en surface indique une restitution rapide des éléments minéraux contenus dans les litières au sol. L'analyse minérale des litières fraîches récoltées à l'automne sous les arbres, nous a permis de chiffrer approximativement ces restitutions (Tableau 23). Celles-ci ne représentent toutefois qu'une partie des apports à la

surface du sol, certains éléments étant apportés en quantités notables par les précipitations (Ca, Na) ou par les pluvioléssivats (K) (HEINRICHS, 1977). L'absence de données analytiques suivies concernant les précipitations et les pluvioléssivats ne nous permet pas d'établir un bilan des apports, sauf en ce qui concerne le fer et l'aluminium qui ne sont présents qu'en faible concentration dans les pluvioléssivats et les précipitations.

Ces données peuvent être comparées avec les flux d'éléments minéraux à travers le sol, calculés à partir des données lysimétriques. Le calcul est effectué en sommant sur l'année, les produits (concentrations) x (volume) et en ramenant le résultat à une surface homogène (m^2) (Tableau 23). Seuls les lysimètres qui ont drainé des volumes d'eau en accord avec leur surface d'ouverture sont utilisés (cf. § 6.4.1.1). Les résultats exprimés en $mg/m^2/an$, ainsi que les stocks contenus dans la litière sont indiqués sur le tableau 23. L'absence de donnée hivernale en ce qui concerne le lysimètre situé en A₁B (due à une erreur de manipulation) ne nous a pas permis de calculer le flux correspondant. En se basant sur les concentrations et les volumes obtenus pendant le restant de l'année, on peut l'estimer à environ trois fois celui mesuré en A₁(2).

TABLEAU 23

Comparaison entre les flux drainés, calculés à partir des données lysimétriques, et les flux restitués au sol par la litière

Flux drainés calculés à partir des données des lysimètres	Ca	Mg	Al	Fe	Mn
A1(1)	880	539	304	81	9
A1(2)	767	245	135	19	13
Flux restitué par la litière d'aiguilles d'épicéa	7410	348	75	24	159

Malgré la variabilité des chiffres présentés que l'on peut attribuer à l'imprécision de la méthode utilisée et à la forte variabilité spatiale des précipitations et des restitutions sous épicéa (AUSSENAC, 1970), la comparaison de ces flux autorise certaines observations :

- Les flux de calcium et de manganèse apportés en surface par la litière sont très nettement supérieurs à ceux mesurés dans les lysimètres. Ce phénomène, bien connu (VEDY, 1973) est à l'origine de la resaturation notable en calcium du complexe absorbant de l'horizon A_1 .
- Les flux d'aluminium et de fer drainés mesurés en lysimétrie sont alimentés pour une forte proportion par le recyclage biologique.

Les racines d'épicéa colonisant profondément le sol, on peut penser que c'est de l'ensemble du sol que proviennent les éléments minéraux concentrés en surface (Ca, Mn) et redistribués en profondeur (Al, Fe). La mobilisation de fer et d'aluminium associés à la matière organique, enregistrée en lysimétrie se ferait donc en grande partie aux dépens de l'ensemble du sol, l'altération des minéraux des horizons A_1 et A_1B ne fournissant qu'une partie de l'aluminium et du fer en solution.

Par ailleurs, les transferts effectués par les lombrics de matière minérale de bas en haut du profil affaiblissant encore le "bilan d'altération" des horizons supérieurs du sol.

6.5 - ETUDE DE LA DEGRADATION DE LA MATIERE ORGANIQUE

Cette étude a été abordée de manière identique à celle utilisée dans les autres stations.

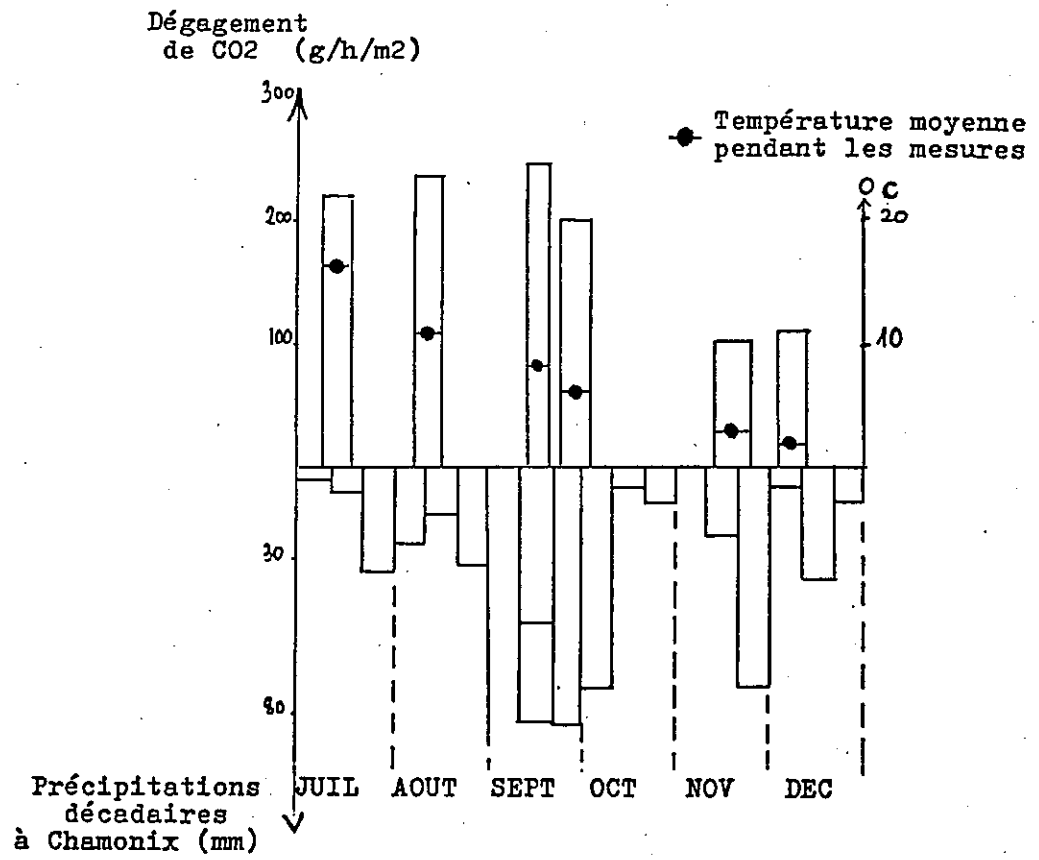


Fig. 49

Dégagement de CO₂ mesuré à certaines périodes de l'année à la surface du sol.

6.5.1 - Mesure de dégagement de gaz carbonique à la surface du sol

Les mesures, d'une durée d'une semaine environ, ont été effectuées chaque mois, de juillet à décembre 1984 (Fig.49).

Les dégagements mesurés varient entre 100 et 250 mg/h/m². Le maximum atteint pendant la période estivale correspond à des températures moyennes et à une période humide (12-21/9). Les valeurs mesurées pendant la période chaude et sèche de juillet sont légèrement inférieures. L'humidité semble en conséquence jouer un rôle important sur l'activité biologique globale du sol. Cette observation doit être toutefois nuancée, car les précipitations, en "chassant" le CO₂ du sol ont pu augmenter artificiellement le dégagement réel (LABROUE, 1976). Par ailleurs, les valeurs enregistrées à basse température ne sont pas négligeables, ce qui pourrait témoigner de l'existence d'une microflore adaptée aux basses températures.

6.5.2 - Evolution morphologique et pondérale des litières test

Les litières ont été déposées en octobre 1983 et ramassées pour partie au début juillet 1984 et pour le reste en octobre 1984. Des feuilles vertes de rhododendron ont, par ailleurs, été déposées en juillet et relevées en octobre 1984 pour tester la biodégradation estivale.

6.5.2.1 - Evolution morphologique

Elle se caractérise par (Tableau 24) :

- Un brunissement ou noircissement dominant des substrats lié à une colonisation importante par des myceliums noirâtres. Cette tendance est moins nette, toutefois sur les litières annuelles d'érable où l'on observe assez fréquemment des décolorations ou un blanchiment lié à la présence de mycelium blanchâtre. Ce noircissement des substrats déposés en surface doit être

Substrat test	ERABLE		MYRTILLE		RHODOS feuilles vertes		PAPIER filtre	
	hiver + printemps	année	hiver + printemps	année	hiver + printemps	été	année	année
Période d'incubation								
couleur du substrat	brun jaune	brun foncé à blanc	brun	brun grisâtre foncé	brun	brun jaunâtre	brun	gris foncé
liaison interfeuilles rigidité	peu liés rigides	liés rigides	liés rigides	liés rigides	liés rigides	liés rigides	liés rigides	rigides
degré de salissure	faible	moyen	moyen	élevé	faible	faible	élevé	très élevé
% surface disparue	moyen	élevé chenaux	moyen	élevé	nul	nul	faible	très élevé
Présence de déjections de la mésofaune	assez nombreuses	très nombreuses	nombreuses	très nombr.	absentes	peu nombr.	assez nombr.	très nombreuses
% Surface occupée par un mycelium blanchâtre	assez élevé sur les nervures	élevé	très faible	faible	très faible	faible	élevé	
% Surface occupée par un mycelium noirâtre	assez élevé	très élevé	assez élevé	très élevé	assez élevé	faible	élevé	élevé
% Surface décolorée à translucide non recouverte par un mycelium	assez élevé	assez élevé	nul	nul	faible	faible	faible	faible

Tableau 2^h EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES DIFFERENTS
SUBSTRATS TEST EN FONCTION DE LA DUREE D'INCUBATION

rapproché des observations macroscopiques notées lors de la description du profil, à savoir, le noircissement des aiguilles d'épicéa en surface, puis leur décoloration dans la sous-couche F sous l'influence d'un mycelium blanchâtre très abondant.

- Un taux élevé de salissure organique et minérale, associé à de nombreuses déjections identifiables et à un fort pourcentage de surface disparue, sur les substrats incubés pendant un an. Ces caractères, que l'on peut attribuer à l'action de la mésofaune, sont cependant moins marqués sur les substrats relevés à la fin du printemps. Ces salissures sont réparties de manière assez homogène sur les différents sachets contenant la même litière. Ceci caractérise une faune assez abondante par unité de surface et suffisamment mobile pour coloniser rapidement les divers substrats.

6.5.2.2 - Evolution pondérale (Tableau 25)

TABLEAU 25

Pertes de poids (%) des différents substrats test
lors de l'incubation sur le terrain.
Nombre de sachets récupérés
(L'écart maximum à la moyenne est inférieur à 10 %, sauf pour les papiers filtres annuels où il est de 50 %)

	hiver + printemps	été	année
Erable	41 (3)	33 (3)	54 (6)
Myrtille	34 (3)		42,5 (6)
Carex	35 (3)		42 (5)
Rhododendron (feuilles vertes)	21 (3)	19 (6)	33 (5)
Rhododendron (litière)	10 (3)		14,5 (6)
Papiers filtres	29 (3)		57,5 (6)
Buchettes (Aulne)			25,5 (7)

Malgré le nettoyage effectué, les litières présentaient toujours lors de la pesée un fort pourcentage de "pollutions" organiques ou minérales, comme nous avons pu le constater, à postériori, au microscope électronique à balayage. Aussi, les pertes présentées sont elles inférieures aux pertes réelles en particulier pour les papiers filtres. On peut cependant classer les litières par ordre décroissant des pertes de poids :

Erable > Myrtille = Carex > Rhododendron > Rhododendron
(feuilles vertes) (litière)

Cette hiérarchie est parfaitement identique sur les substrats incubés six mois ou un an. La décroissance en fonction du temps de la perte de poids ne semble pas affecter plus particulièrement certains substrats. Par ailleurs, l'homogénéité de la colonisation des substrats par la faune, notée précédemment, se retrouve dans la faible dispersion des pertes de poids mesurées pour un même substrat.

6.5.3 - Inventaire succinct de la faune du sol

L'arrosage du sol en place par une solution de formaldéhyde dilué nous a confirmé l'existence d'une population notable de lombrics (quatre individus extraits sur un m²).

L'extraction par la méthode des entonnoirs de Berlese nous a fournis pour l'horizon A₀ :

- Une population considérable d'acariens oribates caractéristiques des litières (contenu intestinal holorganique) à laquelle on peut attribuer les nombreuses déjections ovales holorganiques présentes dans les aiguilles d'épicéa et observées en lame mince.
- Une faible population de collemboles.
- Quelques enchytréides, diplopodes, larves de diptères et de coléoptères.

Pour l'horizon A₁ :

- Une faible population d'oribates
- Une population importante de collemboles et dans une moindre mesure d'enchytréides, ces derniers représentant toutefois la biomasse la plus forte.

Deux grandes fonctions, en ce qui concerne le sol, caractérisent donc cette faune :

- La fragmentation des litières dont les oribates, et dans une bien moindre mesure les diplopodes, sont responsables.
- L'incorporation de la matière organique issue des litières, à la matière minérale du sol. Elle est le fait des enchytréides et surtout des lombrics dont l'action de "brassage" avait été notée dès la description du profil.

6.5.4 - Interprétation

La dégradation de la matière organique fait intervenir une large gamme d'organismes dont nous avons pu confirmer par différentes méthodes l'activité. La mésofaune, abondante et diversifiée, favorisée par un climat relativement clément et "tamponné" (absence de gel du sol ou de forte sécheresse estivale) et par une forte production de litière, fragmente et incorpore profondément les débris végétaux, pourtant réputés résistant à la dégradation (aiguilles d'épicéa). L'activité microbienne se traduit par une tendance au noircissement des litières en surface attribuable aux hyphes mycéliens mélanisés. Cette tendance n'est cependant pas générale, comme le montre la décoloration partielle des feuilles d'érable en surface, et des aiguilles d'épicéa, dans la couche F de l'humus.

6.6 - CONCLUSION A L'ETUDE DE LA STATION DU LAVANCHER

Développés dans des colluvions en pente forte à l'étage montagnard, ces sols sont marqués par une forte activité de la faune en surface, à l'origine d'un humus de type mull-moder, et par une faible accumulation de fer et d'aluminium libre dans les horizons B, qui leur confère leur caractère ocreux. Le climat général, relativement clément à cette altitude (quatre mois d'enneigement représentant environ le un tiers des précipitations), a favorisé sur ces pentes l'installation d'une pessière dense, profondément enracinée dans les sols, qui atténue fortement l'intensité des précipitations ainsi que les fluctuations pédoclimatiques.

L'étude du fonctionnement biogéochimique du sol met en évidence :

- Un cycle biologique profond et rapide souligné par la faible accumulation de matière organique en surface. La mésofaune abondante et diversifiée fragmente et incorpore profondément les débris végétaux. L'activité de la microflore que l'on peut estimer approximativement au double de celle mesurée à l'étage subalpin ne se traduit cependant pas par une décoloration rapide des feuilles qui caractérise les milieux très actifs (mull).
- Un mécanisme actif de podzolisation qui se traduit par des conditions de milieu complexantes quelle que soit la saison et par une migration profonde, à des teneurs relativement élevées, de carbone, d'aluminium et dans une moindre mesure de fer, des horizons supérieurs vers les horizons B où ils s'insolubilisent.
- La fourniture en surface par les litières d'une proportion importante de l'aluminium et du fer drainés à travers les horizons supérieurs du sol. L'accumulation de ces produits dans l'horizon B se ferait donc pour une part importante à travers le cycle biologique et aux dépens de l'ensemble du sol.

Ce mécanisme de recyclage ainsi que les remaniements qui affectent périodiquement ces sols, pourraient être à l'origine du "décalage" apparent entre la forte podzolisation géochimique constatée au niveau du fonctionnement et la faible différenciation des profils.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

DISCUSSION

INTRODUCTION

L'étude approfondie des stations nous a permis de mettre en évidence dans quatre situations particulières, certains des mécanismes par lesquels le climat et la végétation interviennent pour déterminer des fonctionnements biogéochimiques actuels.

La comparaison de ces mécanismes suivant la séquence altitudinale définie par nos stations, va dans un premier temps, nous permettre d'étudier à travers ces quatre cas particuliers, comment l'étagement bioclimatique altitudinal détermine un étagement des sols. Dans un deuxième temps, nous nous servirons des connaissances acquises lors des études de fonctionnement, pour réinterpréter la distribution des grands processus pédogénétiques et des sols dans le paysage.

1. COMPARAISON ENTRE LES FONCTIONNEMENTS ACTUELS DE QUATRE STATIONS ETAGEES

Nous comparerons successivement les pédoclimats, puis les fonctionnements biologiques, biodégradation de la matière organique et cycle biologique, et enfin les fonctionnements biogéochimiques. La situation bioclimatique des stations étudiées est rappelée sur le tableau 25.

ETAGE	ALPIN	SUBALPIN	MONTAGNARD
STATION	Nivose	Lognan	Lavancher
ALTITUDE	2.350m	1.950m	1.200m
EXPOSITION	S.E.	N.W.	N.W.
NIVOPLUVIOMETRIE	Très variable 2.000 mm à	variable spatialement 1.700 mm	1.200 mm
LONGUEUR DE LA PERIODE HORS NEIGE	3 mois	5 mois	8 mois
VEGETATION	Pelouse alpine à Carex curvula à Nard et Trèfle des Alpes	Lande à Rhododendron	Pessière dense
PRODUCTIVITE AERIENNE DE LITIERE	50g/m ²	150g/m ²	300g/m ²
SOL	ranker humifère ("cryptopodzolique")	Podzol humoferrugineux	Sol brun faiblement ocreux
SUBSTRAT	Colluvions peu fragmentés reposant sur une dalle de gneiss	Moraine granitogneissique	Colluvions granito- gneissiques de pente

Tableau 25 : Bioclimats et sols des stations étudiées.

1.1 - INFLUENCE DU FACTEUR BIOCLIMATIQUE SUR LE PEDOCLIMAT

Le climat général sépare d'emblée les stations placées dans des étages bioclimatiques différents (Tableau 25). La période "hors neige" et "hors gel" dure environ trois à quatre mois à l'étage alpin, cinq mois à l'étage subalpin, et huit mois à l'étage montagnard. Pendant cette période, la température des sols est déterminée par l'altitude, l'exposition et la végétation des stations, mais aussi par les caractères du sol et en particulier, sa capacité et sa teneur en eau.

Si les températures moyennes estivales du sol sont faibles à l'étage alpin, les fluctuations journalières, directement liées à l'ensoleillement reçu, ainsi que les températures maximales atteintes sont très élevées en raison de l'altitude et de l'absence de couvert végétal dense (Fig.50).

A Lognan (subalpin), si les fluctuations des températures de l'air au-dessus du sol sont les plus fortes, celles-ci sont très rapidement amorties par l'humus brut.

A l'inverse, c'est la pessière dense qui, au Lavancher (montagnard), "écrête" toutes les fluctuations thermiques, le sol étant, lui, relativement bon conducteur de la chaleur. La température du sol de ces deux dernières stations est en conséquence réglée par le gradient bioclimatique c'est-à-dire en définitive par l'altitude.

Pendant la période enneigée, le sol, toujours proche de 0°C gèle dans certaines situations particulières (face Nord de l'étage alpin, crêtes ventées de l'étage subalpin). Les stations étudiées n'ont été qu'accidentellement affectées par un gel de courte durée.

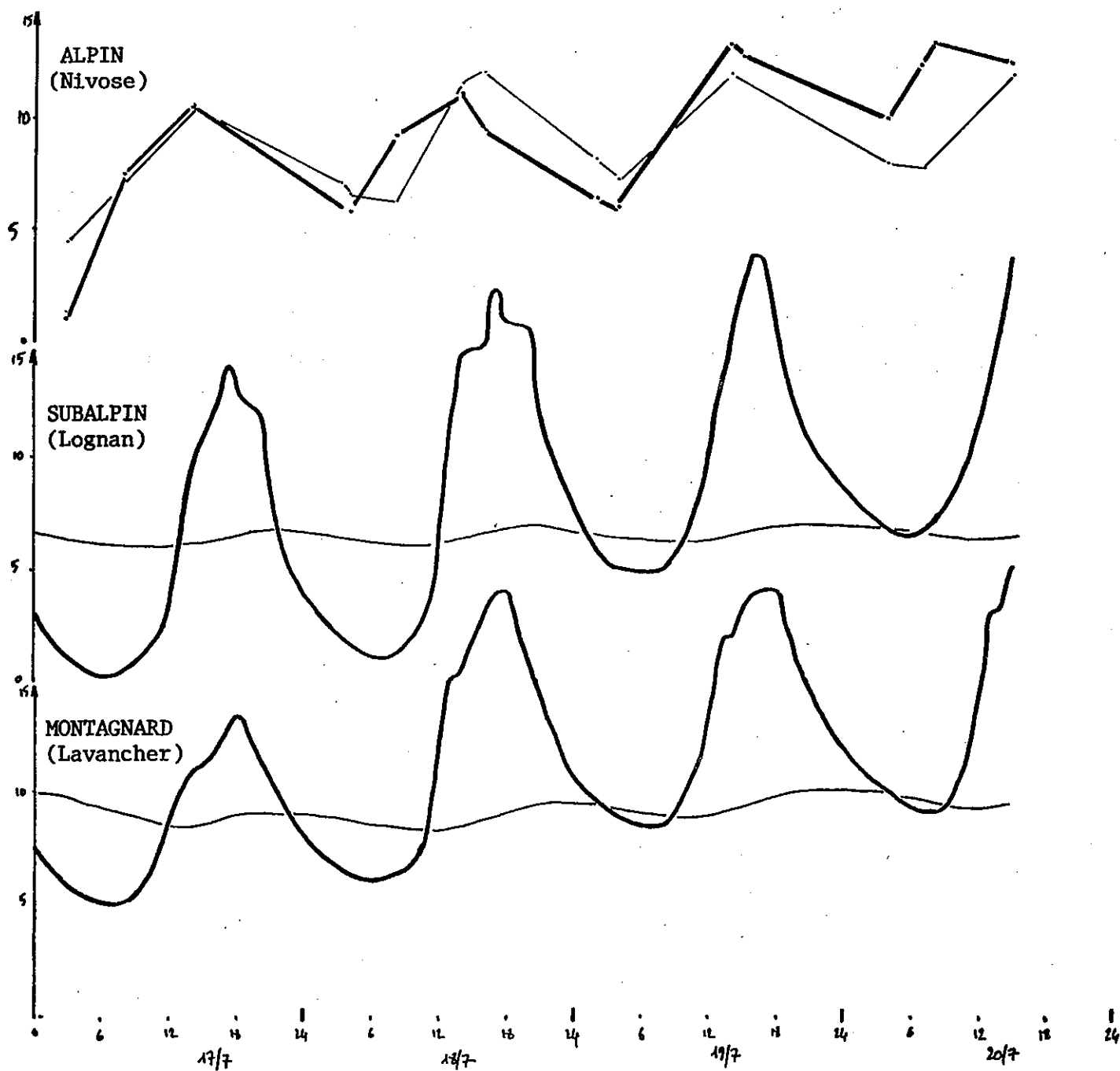


Fig. 50: Evolution des températures dans l'air et dans le sol dans 3 des stations étudiées - Période du 18/7 au 21/7.

- à + 10 cm au dessus du sol
(à + 2m à l'étage alpin)
- à - 10 cm dans le sol

L'accumulation de neige représente en moyenne les $3/4$ de la pluviométrie à l'étage alpin, les $2/3$ à l'étage sub-alpin et environ $1/4$ à l'étage montagnard. Cependant ces chiffres généraux masquent une redistribution de la neige, des crêtes vers les creux sous l'action du vent. Ce phénomène détermine une forte variabilité de la pluviométrie stationnelle que nous avons du prendre en compte dans la station de Lognan (subalpin).

La fonte de la neige s'effectue lentement, par la base du manteau neigeux, sous l'action du flux géothermique, pendant la plus grande partie de la période enneigée. La "fonte rapide" apparaît à la fin de cette période, sous l'influence de l'augmentation des températures moyennes et de l'ensoleillement. La fonte est d'autant plus intense que l'enneigement est tardif, donc à haute altitude, car elle coïncide alors avec les températures maximales journalières et les insolationes les plus fortes. Cette eau de fonte n'est cependant pas toujours, intégralement transmise au sol sous jacent. En effet, l'alternance de périodes très froides, succédant à des périodes de fonte rapide peuvent conduire au gel de la couche de neige, gorgée d'eau, située à la base du manteau neigeux. Ces croûtes de glace peuvent déterminer des redistributions locales d'eau de fonte, comme nous avons pu le constater dans les stations de Balme et de Lognan.

La part des précipitations sous forme neigeuse par rapport aux précipitations annuelles, détermine le bilan hydrique des stations ; en effet, ces précipitations ne sont, à l'inverse de ce qui se produit pour les précipitations estivales, pas ou très peu (Pessière montagnarde) compensée par une évapotranspiration.

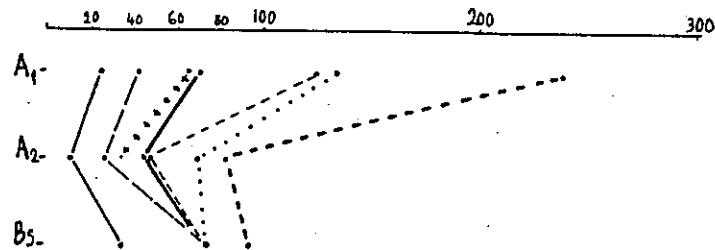
L'évolution des teneurs en eau et des hauteurs d'eau drainées à travers les sols est fonction de la teneur en matière organique, texture et structure des horizons ainsi que de l'intensité relative de la fourniture hydrique et de l'évaporation (Fig. 51).

La station de Nivose (étage alpin) se caractérise par une forte porosité des horizons et par la présence d'une dalle rocheuse imperméable à la base du sol qui induit une dynamique latérale des solutions à son contact. Cette fourniture hydrique latérale, qui correspond aux eaux d'infiltration d'un micro bassin versant, limite la dessiccation, lors des périodes de sécheresse estivale, à l'horizon superficiel. Inversement le sol de Balme (alpin) pour lequel la fourniture hydrique latérale est faible, subit de fortes et profondes fluctuations de teneurs en eau, favorisées par son exposition (sud).

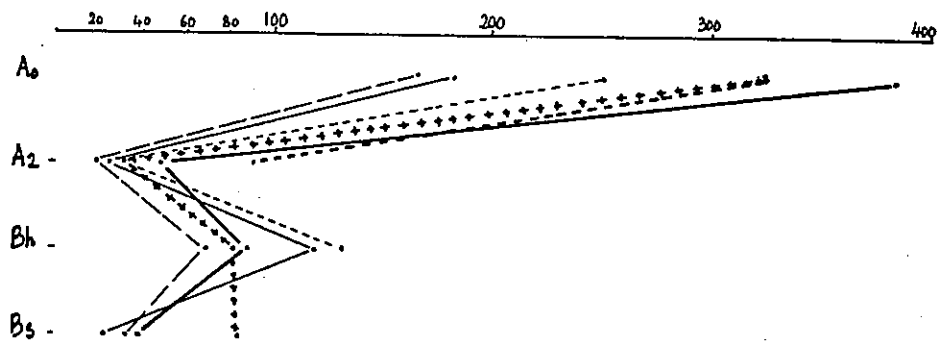
A Lognan (subalpin) l'humus brut dont la capacité de rétention est considérable joue le rôle d'amortisseur vis-à-vis des fluctuations de teneurs en eau. Cependant le régime hydrique des sols varie en fonction de leur position sur la moraine : la fourniture hydrique verticale est plus faible (moindre enneigement) et l'évapotranspiration est plus forte sur les crêtes de moraines ce qui se traduit par d'importantes fluctuations de teneur en eau. Inversement les structures très généralement parallèles à la pente des sols favorisent un drainage latéral des solutions ce qui limite les fluctuations de teneur en eau des horizons profonds des sols situés sur la pente.

Au Lavancher (montagnard) les fluctuations de teneurs en eau ne sont notables qu'en surface. Une grande partie des précipitations est soit interceptée soit recyclée par la Pessière.

BALME



LOGNAN



LAVANCHER

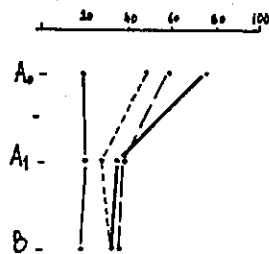


Fig. 51 : Domaine de fluctuations des teneurs en eau en fonction de la profondeur dans 3 stations, alpine, subalpine et montagnarde.

CONCLUSION

Dans les stations étudiées, l'étagement bioclimatique se traduit lorsque l'on monte en altitude, par :

- Une diminution de la période hors neige et donc de la température moyenne annuelle des sols.
- Des fluctuations thermiques du sol faibles aux étages montagnard et subalpin et fortes à l'étage alpin.
- Une augmentation générale et un déplacement vers la période hivernale des flux d'eau drainés à travers les sols.
- Une variation accrue des hauteurs d'eau transmises aux sols suivant leur position dans le paysage.
- Une augmentation des fluctuations de teneurs en eau des sols nuancée localement par des fournitures hydriques latérales.

1.2 - INFLUENCE DU FACTEUR BIOCLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS

1.2.1 - Biodégradation de la matière organique

L'introduction artificielle de différentes litières dans trois stations étagées nous a permis de mettre en évidence leur influence sur l'accumulation de matière organique à un étage déterminé. En effet, on observe une hiérarchie des litières, en ce qui concerne leur aptitude à la biodégradation, quelle que soit l'étage (Tableau 26) :

Carex > Myrtille > Rhododendron

Cette hiérarchie met en évidence la résistance particulière des litières subalpines et inversement le caractère labile des litières alpines (Carex). La litière d'épicéa (montagnard) n'a pu être testée.

La comparaison des pertes de poids d'une litière labile en fonction de la période d'incubation (Tableau 27) montre clairement, par ailleurs, l'importance considérable de la minéralisation estivale par rapport à l'hivernale.

Tableau 26 : Perte de poids de différents substrats après incubation annuelle en fonction de l'étage bioclimatique

		Alpin	Subalpin	Montagnard
Litière	Erable	52		54
	Carex		50	42
	Myrtille	30	40	42,5
	Rhododendron (feuilles vertes)	25,7	31,5	33

Tableau 27 : Perte de poids d'une litière d'érable en fonction de l'étage bioclimatique et de la période d'incubation (%)

Erable	Alpin	Subalpin	Montagnard
Incubation hivernale (octobre à juillet) (9 mois)	34	33	41
Incubation estivale (juillet à octobre) (~3 mois)	28	33	33

L'évolution pondérale des litières-test station par station indique :

- Au Lavancher (montagnard), de fortes pertes de poids malgré d'importantes pollutions minérales. Cette évolution est en relation avec l'intense activité d'une mésofaune abondante et diversifiée (oribates, collemboles, lombrics), capable d'effectuer un fort brassage organo-minéral.
- A Lognan (subalpin), des pertes de poids intermédiaires entre celle mesurée au montagnard et à l'alpin. La mésofaune est relativement abondante mais peu diversifiée (collemboles diplopodes) et incapable d'effectuer un brassage organo-minéral.
- A Nivose (alpin), des pertes de poids fortes sur les substrats les plus labiles (érable, carex) et faibles sur les substrats résistants (rhododendron, myrtille). Cette observation tendrait à confirmer l'opinion suivant laquelle le pédoclimat alpin serait apte à la biodégradation des substrats labiles, mais serait incapable d'assurer celle des substrats plus résistants (LABROUE 1976). L'action de la mésofaune semble par contre marginale. Cette "carence" de la mésofaune n'est cependant pas générale à l'étage alpin (MATTHEY, 1981). La station de Balme en particulier présente une mésofaune très abondante à base d'enchytreïdes.

La colonisation des diverses litières par la microflore se traduit par un noircissement généralisé dans toutes les stations, après l'incubation hivernale. L'incubation annuelle fait par contre apparaître des divergences nettes entre les stations (Tableau 28) :

- A Nivose (alpin), on observe une tendance à la décoloration des litières, qui semble associée à la disparition des membranes cellulaires ou des granules arrondis accolés aux parois cellulaires. Ce type d'évolution pourrait caracté-

Tableau 28 : Evolution morphologique des litières test et faune des sols dans les 3 stations étagées

ETAGE	ALPIN (nivose)	SUBALPIN	MONTAGNARD
EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES LITIÈRES TESTS	Couleur	Noircissement hivernal Noircissement estival	Noircissement hivernal Décoloration partielle estivale
	Liaison interfeuilles	fortement liées	peu liées
	rigidité	rigides	rigides
	Incorporation de fragments minéraux	faible	très forte
FAUNE DU SOL	Présence de déjections de la mésofaune	assez nombreuses variable	nombreuses
	Inventaire (estival)	Absence de lombrics	Présence de lombrics
	Fonction principale	forte population peu diversifiée de collem- bolles et d'oribates	forte population d'oribates faible population de collembolles enchytréides, diplopodes
		Forte population de diplopodes	Fragmentation et brassage organo-minéral
	Fragmentation et brassage organo-minéral (peu intense)	Fragmentation et brassage holorganique	

riser, d'après TOUTAIN (1981), les milieux à forte activité de pourritures blanches.

- A Lognan (subalpin), le noircissement hivernal associé à une forte colonisation par des hyphes mycéliens mélanisés se maintient pendant l'été. On observe parallèlement une accumulation de débris mycéliens mélanisés dans l'humus.

- Au Lavancher, l'évolution semble intermédiaire : les substrats noircissent généralement mis à part les substrats les plus labiles sur lesquels on observe des décolorations partielles. Cette tendance est confirmée par l'évolution des litières d'épicéa dans l'humus : elles sont brun foncé à noires à la surface du sol et brun clair à décolorées et envahie par un mycélium blanchâtre dense, dans la couche F de l'humus.

Les mesures de dégagement de gaz carbonique à la surface du sol montrent une activité en moyenne nettement supérieure au Lavancher qu'à Lognan (Fig.52). Cependant le rapport entre les dégagements enregistrés dans les deux stations diminue pendant la période estivale (< 2) et augmente (> 2) à la fin de l'automne lorsque la température à Lognan est voisine de 0°C . Or les productivités moyennes de litière estimées au Lavancher sont environ le double de celles estimées à Lognan. Malgré l'imprécision de ces mesures, liée en particulier au dégagement de CO_2 par les racines, on peut penser que le ralentissement à Lognan de la biodégradation pendant la longue période hivernale est compensé en partie par une forte activité estivale.

L'unique mesure estivale effectuée à Nivose (alpin) nous a fourni une valeur égale à celle mesurée à Lognan ($193 \text{ mg/m}^2/\text{h}$) et assez proche de celle enregistrée pendant la même période au Lavancher ($233 \text{ mg/m}^2/\text{h}$). Cette intense minéralisation estivale à l'étage alpin ne compense cependant

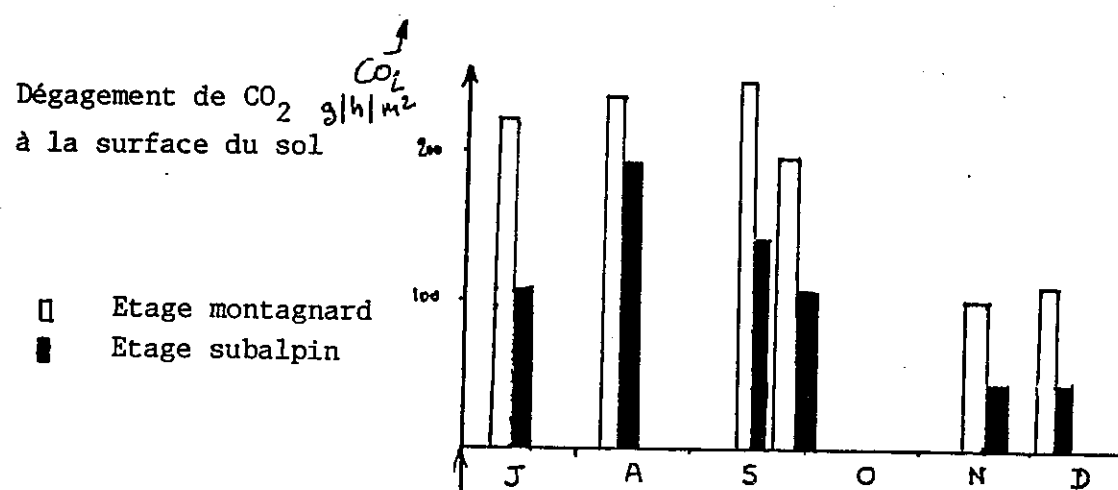


Fig. 52 : Evolution saisonnière du dégagement de CO_2 à la surface du sol dans deux stations (subalpine et montagnarde)

pas, la faible minéralisation annuelle comme en témoigne l'accumulation de matière organique dans ces sols.

CONCLUSION

Dans les stations étudiées, l'étagement bioclimatique se traduit, en ce qui concerne la biodégradation par :

- A l'étage alpin, une accumulation de matière organique dans l'ensemble du profil liée au mode de restitution et la faiblesse de la minéralisation annuelle. L'importance de l'accumulation semble cependant très variable en fonction du degré de fragmentation du matériau.
- A l'étage subalpin, une accumulation de matière organique en surface liée à la faible minéralisation annuelle, à la restitution en surface d'une litière particulièrement résistante et à l'absence de brassage par la mésofaune.
- A l'étage montagnard, une faible accumulation de matière organique liée à la présence d'une microflore et d'une mésofaune diversifiée et active pendant la plus grande partie de l'année.

1.2.2 - Cycle biologique

Nous comparerons successivement les cycles biologiques des deux stations de l'étage alpin puis des stations sub-alpine et montagnarde.

La végétation de l'étage alpin se différencie de celle des autres étages par un enracinement fin, diffus et profond et par l'importance des restitutions dans le sol sous forme de racines.

La station de Balme (alpin) porte une pelouse de forte productivité aérienne ($\sim 200 \text{ g/m}^2$), riche en légumineuses.

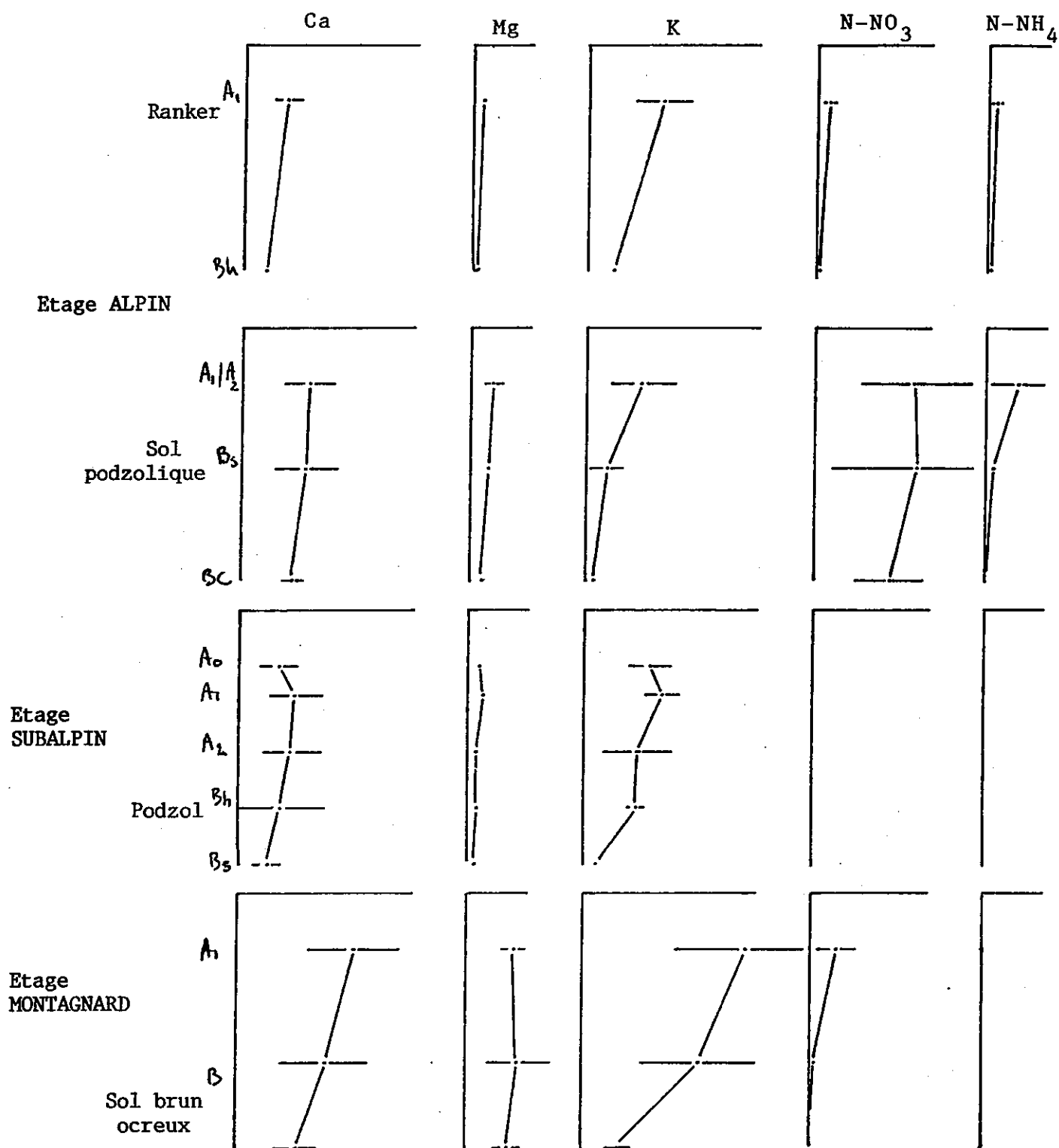
Les eaux gravitaires contiennent des concentrations relativement élevées en bases et surtout en azote minéral, liées à une minéralisation et à une nitrification notables. Les exportations, hors du volume de sol prospecté par les racines concernent essentiellement le calcium, l'aluminium et le nitrate ; le potassium est énergiquement retenu. Ces pertes en cations sont cependant faibles si on les ramène à l'ensemble du volume minéral fragmenté disponible prospecté par les racines.

La station de Nivose (alpin) porte une pelouse de faible productivité aérienne (50 g/m^2) dépourvue de légumineuses. Le sol présente de faibles teneurs en bases dans les eaux gravitaires, quelle que soit la dilution, et exporte latéralement, hors du volume prospecté par les racines, des quantités de potassium d'autant plus importantes que le volume minéral fragmenté disponible pour l'altération est faible.

La cause de la divergence entre les fonctionnements biologiques de ces deux systèmes nous semble résider dans la différence d'altitude, d'exposition et de richesse chimique du substrat, mais aussi et surtout dans la différence de degré de fragmentation du matériau c'est-à-dire dans l'abondance relative de matériel minéral fragmenté disponible pour l'altération.

La station de Lognan (subalpin) porte une lande dense à rhododendron et myrtille dont l'enracinement est, pour sa plus grande part, concentré en surface dans l'humus brut. La productivité aérienne de litière, de l'ordre de 150 g/m^2 s'élabore donc essentiellement à partir des éléments minéraux présents dans les horizons supérieurs du sol. Cette particularité est due à la concentration des nutriments en A_0 , à la nature des espèces végétales à enracinement superficiel (rhododendron), et à l'induration très forte des horizons Bs particulièrement sur la crête de la moraine. Les

Fig. 52 : Evolution des concentrations moyennes pondérées en Ca, Mg, K, N-NO₃, N-NH₄ en fonction de la profondeur dans les eaux gravitaires des 4sols étudiés (les traits horizontaux représentent l'intervalle de confiance à 5%)



flux enregistrés dans les horizons A1 et A2 des sols de crête constituent des pertes nettes pour ces horizons et pour la végétation dans la mesure où ils sortent du volume de sol exploré par les racines. Ceci est d'autant plus vrai que le brassage des horizons par la mésofaune est négligeable. La production végétale se fait donc aux dépens d'un faible volume minéral fragmenté (horizons supérieurs) soumis à une altération très intense.

La station du Lavancher (montagnard) porte une pessière dense profondément enracinée dans les sols. La productivité aérienne de litière, de l'ordre de 300 g/m^2 s'élabore donc à partir de l'ensemble du sol. Cette forte productivité est en relation avec les fortes teneurs en bases mesurées dans les eaux gravitaires des horizons supérieurs. La comparaison entre les flux d'éléments minéraux enregistrés dans les eaux lysimétriques et les flux de matière apportés en surface par la litière explique la forte resaturation du complexe absorbant de l'horizon A_1 . Les pertes des horizons supérieurs du sol sont d'autant moins fortes que les lombrics pratiquent un brassage important des horizons.

Les cycles biologiques de ces deux dernières stations divergent donc profondément : à Lognan, la végétation est un facteur d'appauvrissement des horizons supérieurs du sol. A l'inverse, au Lavancher, la végétation est un facteur d'appauvrissement de l'ensemble du sol, et d'enrichissement de sa partie supérieure. La mésofaune intervient dans le même sens.

CONCLUSION

La décroissance globale de la productivité aérienne de litière, liée à l'étagement de la végétation, avec l'altitude s'accompagne d'une réduction progressive de l'intensité du cycle des cations et anions "biologiques" (Ca , K , Mg , Mn , NH_4 , NO_3) (Fig.52).

Cette tendance générale est nuancée en fonction de deux grands facteurs :

- Le degré de fragmentation du sol, à travers la disponibilité relative de matériel altérable, apparaît à l'étage alpin, comme un déterminant majeur de l'intensité du cycle biologique, c'est-à-dire de la fertilité du milieu.
- La profondeur d'enracinement, en ce qu'elle distingue les cycles biologiques redistributifs (alpin, montagnard) des cycles biologiques appauvrissants (subalpin).

1.3 - FONCTIONNEMENT BIOGEOCHIMIQUE

Ces fonctionnements sont comparés à travers les différentes techniques utilisées.

1.3.1 - Evolution des minéraux test

L'évolution chimique et minéralogique des minéraux tests placés dans les horizons supérieurs des sols des trois stations de haute altitude se traduit par une stabilité ou une augmentation de la capacité d'échange des échantillons incubés pendant l'hiver, et une réduction de cette capacité d'échange associée à une fixation d'aluminium interfoliaire après une incubation annuelle. Ceci peut être interprété comme résultant d'un milieu complexant l'hiver et peu complexant l'été. Cette divergence entre les fonctionnements saisonniers doit être rapprochée d'une part de la forte dilution des solutions à la fin de l'hiver (en particulier à l'étage alpin) qui s'oppose à leur "confinement" estival, et d'autre part, de l'intense minéralisation du carbone durant l'été.

Cependant, cette divergence des fonctionnements saisonniers ne se traduit pas par une variation parallèle des

teneurs en carbone dans les eaux lysimétriques, comme on aurait pu le supposer. Si l'on exclue un artéfact de fonctionnement des dispositifs, cette contradiction apparente suggère une variation saisonnière de la nature des composés organiques solubles, non prise en compte par l'analyse du carbone total en solution.

L'évolution des minéraux dans les horizons Bh et Bs de ces sols se traduit par une réduction de la capacité d'échange liée à la fixation d'aluminium interfoliaire. Ce comportement, moins marqué dans les stations alpines que dans la station subalpine traduit le caractère peu complexant de ces horizons ainsi que leur disponibilité relative en aluminium.

Inversement les évolutions observées au Lavancher semblent parallèles quelle que soit la saison : l'augmentation générale des capacités d'échange jusqu'au sommet de l'horizon B peut être interprétée comme résultant d'un milieu fortement complexant. Ce type d'évolution a déjà été observé par RANGER (1984) sous des litières d'épicéa, dont on connaît par ailleurs le rôle "acidifiant" (GUELLEC 1982), lors d'incubation de plus longue durée. La persistance du caractère complexant jusque dans l'horizon B₁ (partie supérieure) contredit par contre les observations de ces auteurs sur des sols du même type ainsi que le faible degré de différenciation du profil. Par contre, des migrations importantes de carbone et d'aluminium à travers les horizons ont été mises en évidence en lysimétrie.

Dans chaque station étudiée, le comportement des minéraux test suggère donc de nombreuses questions, auxquelles nous n'avons pu répondre dans le cadre de ce mémoire. Leur évolution saisonnière contrastée dans les trois stations d'altitude, nous semble cependant très révélatrice et féconde.

1.3.2 - Lysimétrie

Au-delà des fonctionnements biogéochimiques particuliers qui règlent la composition chimique des eaux dans chaque station, les teneurs générales en éléments ainsi que les flux drainés à travers les sols sont en grande partie contrôlés par le rythme saisonnier et l'intensité de la fourniture hydrique : les concentrations des éléments en solution sont généralement maximales pour de faibles volumes d'eau drainés, pendant la période de sécheresse estivale. A l'inverse, les concentrations sont les plus faibles lors des derniers moments de la fonte des neiges et pour les altitudes les plus élevées.

Les flux hydriques qui traversent les sols sont déterminés par le bilan hydrique de la station. Si au Lavancher (montagnard) les hauteurs d'eau drainées à travers les horizons supérieurs pendant l'hiver sont du même ordre de grandeur que ceux drainés pendant l'été, en revanche dès l'étage subalpin et à fortiori à l'étage alpin la neige représente la plus grande partie des hauteurs d'eau drainées en profondeur par le sol, mis à part dans certaines situations particulières (crêtes ventées, redistribution locales). Quel que soit l'effet de dilution, en particulier lors des derniers jours de la fonte des neiges, les flux de matières drainés en profondeur pendant l'hiver forment aux étages subalpins et alpins l'essentiel des flux annuels. En conséquence toute réduction de la durée et du volume des précipitations sous forme de neige se traduit par une forte réduction des flux d'eau et d'éléments minéraux drainés en profondeur.

L'étude lysimétrique engagée nous a donné l'accès à des ordres de grandeur des concentrations et des flux de matière dans les eaux gravitaires percolant à travers les sols étudiés.

* Les données obtenues sur le sol de Nivose (ranker humifère) sont partielles (uniquement estivales) et ne permettent pas de comparaison strictes entre les deux horizons prospectés du fait de la disproportion entre les volumes drainés. Elles nous ont cependant permis d'observer (Fig.53) :

- Une faible migration d'aluminium et de carbone de l'horizon A₁ vers l'horizon Bh où le carbone s'accumule, tandis que la plus grande partie de l'aluminium est exporté latéralement dans les eaux de drainage.

- Une absence de migration de fer dans les limites de détection des techniques utilisées.

Ces caractères sont confirmés par la microanalyse des constituants du sol, qui montre que l'accumulation d'aluminium et surtout de fer détectée par les analyses chimiques dans l'horizon Bh, est en grande partie relictuelle.

Par ailleurs, les très faibles teneurs mesurées sont en relation avec le faible volume minéral fragmenté disponible pour l'altération, à travers lequel les eaux circulent rapidement.

* Le fonctionnement géochimique "peu actif" de ce sol s'oppose à celui du sol de Balme pour lesquels plusieurs processus interviennent (Fig.53) :

- La nitrification particulièrement active l'été, provoque la mise en solution de quantités importantes de nitrates, d'aluminium et de calcium et leur migration profonde jusqu'en BC. Cette migration d'aluminium et de calcium sous forme non complexée est confirmée par la forte fixation d'aluminium interfoliaire et par la diminution de la part du calcium fixée sur la capacité d'échange des minéraux test après l'été. Elle participe à l'appauvrissement absolu de

l'ensemble du sol en aluminium par rapport à l'horizon BC.

- L'hydromorphie liée à la faible porosité de l'horizon A₂ se manifeste par des gainages racinaires fugaces et par une migration profonde de fer lors des épisodes de forte pluviométrie. Ces migrations profondes de fer pourraient être à l'origine de l'appauvrissement en fer du sol par rapport à l'horizon BC.

- La podzolisation se traduit par une faible migration conjointe de matière organique, de fer et d'aluminium.

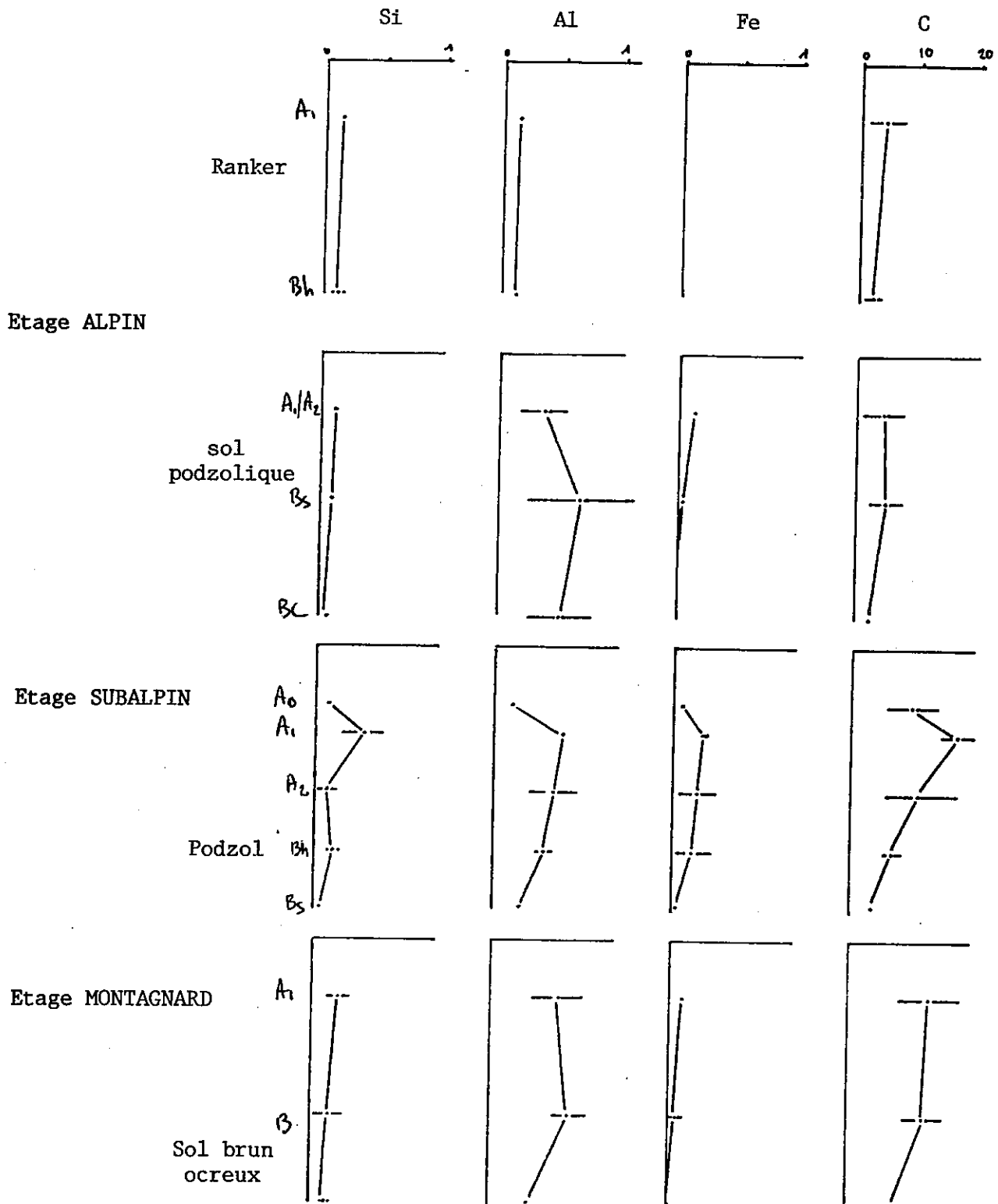
Le degré de fragmentation du sol nous semble être en grande partie à l'origine des divergences entre les fonctionnements de ces deux sols de l'étage alpin. Il intervient en réglant la surface altérable disponible, mais aussi à travers la porosité des sols, sur les temps de contact entre les solutions percolantes et les surfaces minérales. L'exposition plus chaude et l'altitude moins élevée de la station de Balme ont, de plus, favorisé l'installation d'une pelouse riche en légumineuses. Celles-ci, à travers leur fourniture en azote au sol, alimentent la nitrification.

* A l'étage subalpin (Lognan), les techniques utilisées nous ont permis de mettre en évidence (Fig.53 :

- Une migration en concentrations relativement élevées de matière organique, de fer et d'aluminium des horizons A₂ vers les horizons Bs. Les proportions relatives de fer et d'aluminium (Al/Fe²) dans les eaux gravitaires des horizons A₂ des sols de crête nous ont été confirmées par la microanalyse, en place des dépôts ultimes couvrant la porosité fissurale des horizons Bs de ces sols.

- Une mobilisation accentuée du fer dans les sols situés sur la pente morainique sous l'influence d'une nappe

Fig. 53 : Evolution des concentrations moyennes pondérées en Si, Al, Fe et C en fonction de la profondeur dans les eaux gravitaires des 4 sols étudiés.
(les traits horizontaux représentent l'intervalle de confiance à 5%)



perchée temporaire.

Ces flux de matière, qui viennent s'accumuler dans l'horizon Bs, sont perdus pour les horizons supérieurs. En effet l'enracinement superficiel des plantes ainsi que l'absence de mésofaune apte à pratiquer un brassage des horizons limitent considérablement le recyclage biologique de ces éléments.

* Au Lavancher (Montagnard), on observe une migration à des concentrations proches de celles enregistrées à l'étage subalpin, de carbone, d'aluminium et de fer, des horizons A₁ vers l'horizon B où le fer s'insolubilise rapidement, tandis que l'aluminium pénètre profondément dans le sol.

La comparaison des flux d'aluminium et de fer contenus dans les eaux gravitaires, avec ceux recyclées par la végétation et par la mésofaune différencie profondément les fonctionnements géochimiques des sols de Lognan et de Lavancher : à Lognan, les flux de matière traversant le sol sont perdus pour les horizons supérieurs du sol et pour la végétation. Au Lavancher, la forêt, dont l'enracinement est profond, recycle une proportion importante de l'aluminium et du fer mis en jeu dans les eaux gravitaires. On peut penser que le brassage occasionné par les lombrics lors de leurs déplacements agit dans le même sens.

Les podzols de Lognan (subalpin) se différencient donc du point de vue de leur fonctionnement actuel des sols bruns du Lavancher, non par la nature des migrations en solution, mais par l'intensité relative des flux drainés en profondeur et recyclés en surface

A l'extrême, les flux drainés à travers les podzols de crête morainique de Lognan dont la fourniture hydrique est faible, et les sols bruns ocreux du Lavancher sont comparables. Seule l'intensité et la profondeur du recyclage biologique distinguent ces deux stations.

	Flux drainé annuellement à la base des horizons		Flux restitué annuellement en surface par la litière	
	A ₁ /A ₂			
	Fe	Al	Fe	Al
Etage subalpin Podzol de crête morainique (enneigement déficient)	91.5	197	35.5	75.5
Etage Montagnard Sol brun ocreux	50	220	24	75

Tableau 26 : Comparaison entre les flux annuels drainés, calculés à partir des moyennes lysimétriques et les flux annuels restitués en surface par la litière dans 2 stations subalpine et montagnarde.

CONCLUSION

La comparaison des quatre cycles biogéochimiques met en évidence trois facteurs à travers lesquels l'étagement bioclimatique détermine un étagement des sols. Ce sont :

- **Le rythme et l'intensité de la fourniture hydrique.** Elle détermine dans un milieu donné, les hauteurs d'eau drainées à travers le sol et donc en définitive les flux de matière.

- **Le recyclage biologique :** l'importance relative des flux recycles à partir des horizons profonds du sol par rapport aux flux drainés vers ces horizons détermine l'expression d'un processus pédogénétique dans le sol.

- **Le facteur "matière organique".** Nous voulons exprimer par ce facteur les teneurs en carbone observées dans les eaux gravitaires qui nous semblent être des indicateurs d'un type d'évolution de la matière organique, et qui séparent nettement l'étage alpin des étages montagnards et subalpins.

2. RELATION ENTRE LES GRANDS PROCESSUS DE PEDOGENESE ET L'ETAGEMENT BIOCLIMATIQUE ALTITUDINAL

Au cours de cette étude nous avons mis en évidence plusieurs processus de pédogénèse intervenant dans le fonctionnement biogéochimique actuel des sols étudiés. Sans que nous puissions, du fait de la diversité des stations et des matériaux, étendre très généralement nos conclusions il nous semble cependant possible de mettre en relation les grands processus de pédogénèse observés et l'étagement bioclimatique altitudinal.

- **La nitrification** nous semble être un processus d'extension limitée mais dont l'influence sur le sol à

travers une mobilisation et une migration profonde de calcium et d'aluminium peut être notable. Nous ne l'avons mise en évidence que dans une position particulière à l'étage alpin, où elle est alimentée par une importante fourniture d'azote due aux légumineuses et, d'une manière marginale, à l'étage montagnard, où elle pourrait être liée à la présence d'espèces végétales fixatrices d'azote présentes en sous bois (aulne vert).

- **L'hydromorphie** nous semble être un phénomène de large extension mais très fugace, peut être en raison du caractère organique des sols et des basses températures et par la même, difficile à mettre en évidence. Elle apparaît lors des fortes précipitations dans des matériaux très fragmentés (Balme) où dans des matériaux fragmentés par suite d'une différenciation pédogénétique jouant le rôle de substrat imperméable (Lognan) et ceci même sur de fortes pentes. Elle est favorisée par de fortes fournitures hydriques, soit verticales lors de la fonte rapide des neiges à haute altitude, soit latérale dans des matériaux fragmentés. Les différenciations granulométriques fréquentes qui conduisent à la formation de structures parallèles aux pentes, nous semblent jouer un rôle essentiel de ce point de vue.

- **La podzolisation**, définie comme la migration conjointe, sous l'influence d'un milieu complexant, de matière organique, de fer et d'aluminium des horizons supérieurs vers les horizons d'accumulation, affecte tous les étages à divers degrés. Elle est modulée par la disponibilité relative de matériel fragmenté pour l'altération. Si l'on estime son intensité en rapportant les flux de carbone mesurés dans les eaux gravitaires, à la productivité végétale, elle est maximale à l'étage subalpin sans cependant se différencier profondément de celle de l'étage montagnard, et semble minimale à l'étage alpin. Si l'on rapporte ces flux à l'accumulation de matière organique en surface, elle apparaît maximale à l'étage montagnard. Cependant, exprimée

ainsi, elle ne se traduit pas directement dans la morphologie du profil.

Pour comprendre les liens entre l'étagement bioclimatique altitudinal et la morphologie des profils, il nous faut prendre en compte une podzolisation au sens large correspondant à la différence entre d'une part les flux de carbone, d'aluminium et de fer migrant en profondeur dans les eaux gravitaires et d'autre part les flux d'aluminium et de fer ramenés en surface à partir de l'ensemble du sol par le cycle biologique (végétation et faune).

Cette différence est maximale à l'étage subalpin. En effet les forts flux de matière déterminés par une fourniture hydrique hivernale importante ne sont pas ou peu compensés par des remontées biologiques du fait de l'enracinement superficiel, de la faible productivité végétale et de l'absence de brassage par la mésofaune des horizons. La stabilité de certaines positions dans le paysage favorise d'autant l'expression de la podzolisation à cet étage.

A l'inverse, la "podzolisation géochimique" mesurée à l'étage montagnard se traduit peu dans la morphologie des sols en raison du fort recyclage par la végétation et par la mésofaune, des flux de matière drainés en profondeur à travers les sols. Les remaniements périodiques qui affectent les pentes à cet étage défavorisent de plus son expression.

L'absence de mesures fiables des flux à l'étage alpin ne nous permet pas de raisonner directement en ces termes. Il semble qu'une différenciation podzolique des profils apparaisse lorsque les fournitures hydriques sont fortes et que le matériel fragmenté disponible pour l'altération est abondant, la matière organique hydrosoluble produite dans l'humus ne jouant qu'un rôle secondaire et saisonnier.

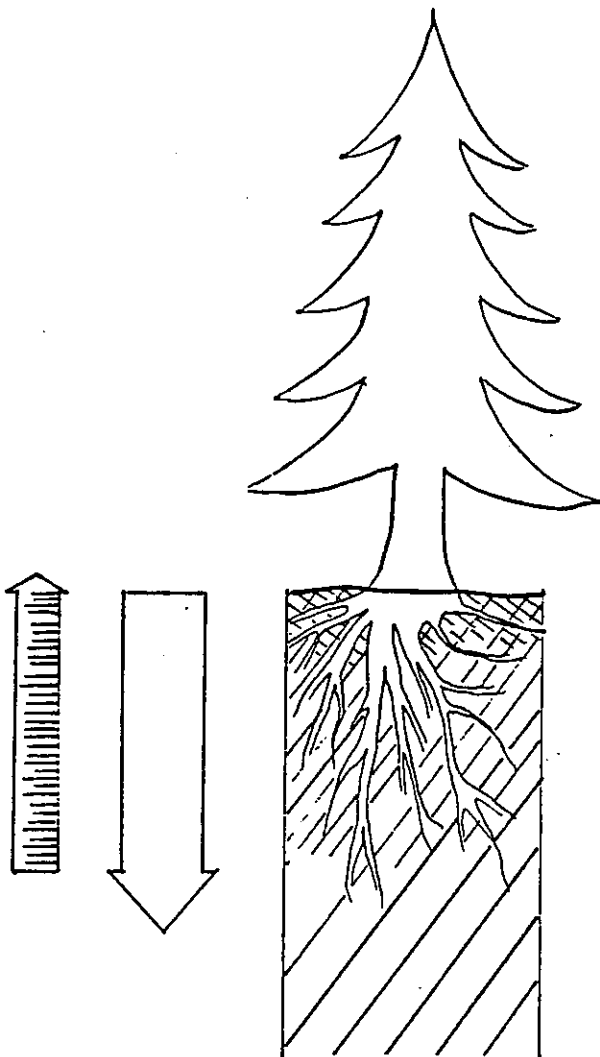
PODZOLISATION GEOCHIMIQUE

ETAGE MONTAGNARD

P : 1200 mm
dont 300 mm en neige

PESSIÈRE

Enracinement profond



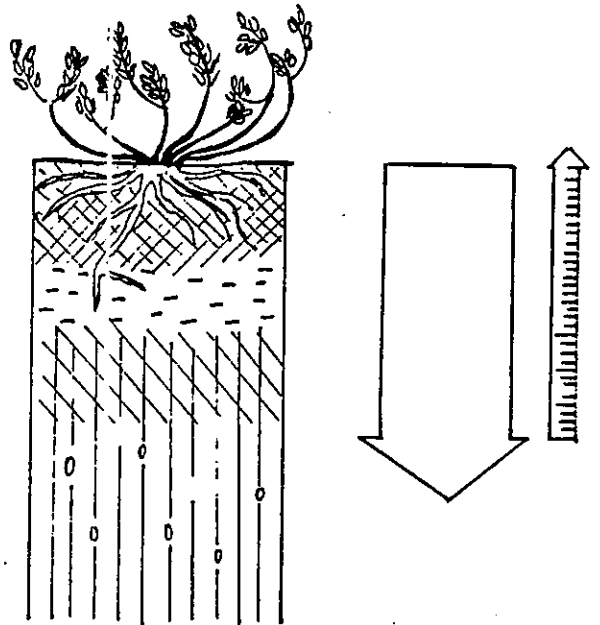
SOL BRUN OCREUX

ETAGE SUBALPIN

P : 1700 mm
dont 900 mm en neige

LANDE

Enracinement superficiel



PODZOL

Fig. 54 : Schéma des flux de Fe et Al drainés ↓ et recyclés ↑ dans les sols montagnards et subalpins

3. RELATIONS ENTRE LES FONCTIONNEMENTS BIOGEOCHIMIQUES ETUDIES ET CERTAINS DES GRANDS FACTEURS DU MILIEU

Dans la première partie de ce travail nous avons dégagé cinq grands facteurs qui confèrent aux sols d'un étage bioclimatique donné des caractères morphologiques particuliers. Puis nous avons analysé les fonctionnements biogéochimiques de certains de ces sols. A la lumière des mécanismes mis en évidence, il nous est maintenant possible de rediscuter certains des grands facteurs à l'origine de sols particuliers.

- La stabilité du milieu

- Elle conditionne la durée de la pédogénèse et donc l'impression dans la morphologie d'un sol d'un fonctionnement donné.

L'instabilité intervient dans le fonctionnement des sols de plusieurs façons :

- Elle fournit en surface un matériel disponible pour l'altération.

- Elle modifie la végétation et les structures du sol : les pentes subalpines instables sont colonisées par une végétation à forte composante de graminées. Celles-ci entraînent une intensification de l'activité biologique en surface (litières labiles) et une forte augmentation des remontées biologiques dues à la profondeur de l'enracinement

- Le degré de fragmentation du matériau

- Il conditionne le volume minéral altérable et donc dans une certaine mesure la "fertilité" mais aussi l'aptitude à l'altération du sol.

- La présence d'un matériau compact (Bs induré) à faible profondeur limite l'enracinement en surface et donc les possibilités de remontées biologiques.

- Les matériaux très fragmentés sont soumis à des phénomènes d'hydromorphie fugace lors des fortes précipitations, dont l'expression dans la morphologie des profils peut être faible, mais dont le rôle dans leur différenciation peut être important (podzol ferrugineux).

- L'exposition

- Elle intervient sur le sol à travers le bilan hydrique, la végétation et le pédoclimat.

- Les flux de matière entraînés à travers les sols sont dominés, dès que l'on monte en altitude, (en l'absence de fourniture hydrique latérale) par la fourniture hydrique hivernale. Les expositions chaudes qui réduisent la durée d'enneigement se traduisent donc par une réduction nette des hauteurs d'eau drainées.

- A l'étage subalpin, les expositions chaudes sont couvertes par des landes à Genevrier, à fort pourcentage de graminées dont la litière est labile et qui favorisent par leur enracinement, les remontées biologiques. A l'étape alpin, les expositions chaudes, qui diminuent la durée d'enneigement sont généralement plus productives.

- Le pédoclimat estival de l'étage alpin dont nous avons vu qu'il semblait favoriser une très intense activité biologique estivale, se traduit par de fortes fluctuations de température et de teneur en eau. Il est en grande partie déterminé par une insolation directe non interceptée par une couverture végétale dense.

Ces mécanismes nous semblent être à l'origine des différences constatées entre les sols subalpins développés, dans des conditions de stabilité identique, sur les deux versants de la vallée.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La distribution générale des sols sur les deux versants de la vallée de Chamonix obéit à l'étagement bioclimatique altitudinal : sols bruns ocreux à ocre podzoliques sous pessière à l'étage montagnard, podzols et sols ocre podzoliques sous les landes subalpines à éricacées de l'étage subalpin, rankers variés sous pelouse à l'étage alpin.

Cet étagement général recouvre cependant une grande variété de sols à l'intérieur de chaque étage bioclimatique, due à la diversité des formations superficielles ainsi qu'à la multiplicité des microclimats.

L'étude effectuée nous a permis de confirmer ou de mettre en évidence les grands facteurs, ainsi que certains des mécanismes qui déterminent cet étagement général des sols ainsi que la diversité des sols de chaque étage.

* Dans une première partie, nous avons dégagé, à la suite d'une prospection approfondie des sols des deux versants de la vallée, cinq grands facteurs du milieu, et différents degrés dans l'expression de chacun de ces facteurs, dont les combinaisons permettent de rendre compte de la diversité des sols dans chaque étage bioclimatique.

Ces facteurs sont :

- La stabilité du milieu.
- La présence d'un substrat compact imperméable dans le volume de matériau intéressé par la pédogénèse.
- Le degré de fragmentation du matériau dans lequel se développe le sol.

- La fourniture hydrique, qui exprime l'intensité de l'alimentation verticale et latérale en eau.
- L'exposition.

La variété des modelés et des formations superficielles dans la région de Chamonix nous a en particulier permis de mettre en évidence, par rapport à des études analogues menées dans d'autres massifs (CABIDOCHÉ, 1979 ; LEGROS, 1975), le rôle primordial joué par la stabilité du milieu édaphique dans la distribution des sols d'un étage bioclimatique donné.

L'action de la stabilité du milieu est double :

Elle conditionne la durée de la pédogenèse dans des conditions bioclimatiques et sur un matériau donné : les sols placés en position stable présentent les évolutions podzoliques les plus affirmées.

Elle favorise la conservation de pédogenèses anciennes correspondant à des conditions bioclimatiques différentes de celles régnant actuellement.

Ceci signifie d'une part, que les sols de haute montagne, bien qu'étant très jeunes, peuvent avoir subi une évolution climatique relativement complexe et d'autre part, que la recherche de sols en équilibre avec leur milieu bioclimatique actuel (climax) ne doit pas être effectuée dans les positions les plus stables, mais plutôt dans des milieux de stabilité intermédiaire.

Inversement, l'instabilité des versants, si elle s'oppose généralement à une évolution podzolique accentuée des sols, est à l'origine, à travers des mécanismes de tri sélectif de particules le long des pentes, de différenciations granulométriques latérales et verticales dans les sols qui modifient leur morphologie et leur fonctionnement.

* Dans une deuxième partie, nous avons tenté de caractériser le fonctionnement biogéochimique des sols de quatre stations étagées, à l'aide de nombreuses mesures portant sur le régime pédoclimatique, l'évolution de la matière organique et le cycle des éléments minéraux.

Dans chaque station, les données obtenues ont tout d'abord été confrontées aux caractères morpho-analytiques des sols.

Malgré l'imprécision des techniques employées et la complexité des phénomènes à prendre en compte, les informations obtenues par l'analyse des fonctionnements sont apparues très généralement cohérentes avec les données morpho-analytiques à l'échelle microscopique. Bien plus, elles nous ont permis d'interpréter certaines distributions mises en évidence par micro-analyse.

Par contre, les fonctionnements mesurés se sont révélés souvent différents de ceux que l'on aurait pu imaginer en fonction de la morphologie et des caractères analytiques généraux des sols.

La comparaison des fonctionnements mesurés à chaque étage nous a ensuite permis d'identifier certains des grands mécanismes (Fig. 55, 56, 57) à travers lesquels les conditions bioclimatiques déterminent la différenciation des sols.

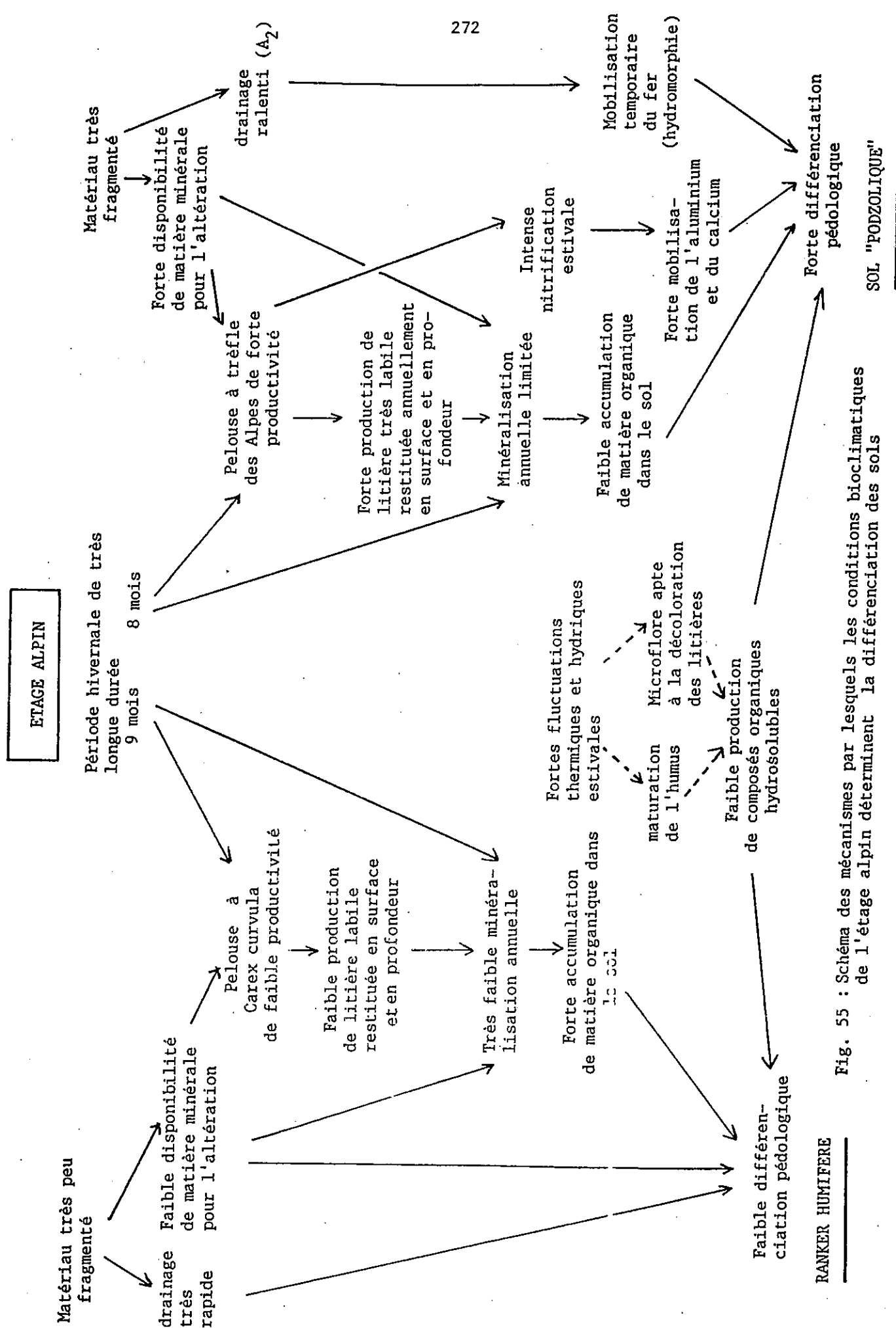


Fig. 55 : Schéma des mécanismes par lesquels les conditions bioclimatiques de l'étage alpin déterminent la différenciation des sols

ETAGE SUBALPIN

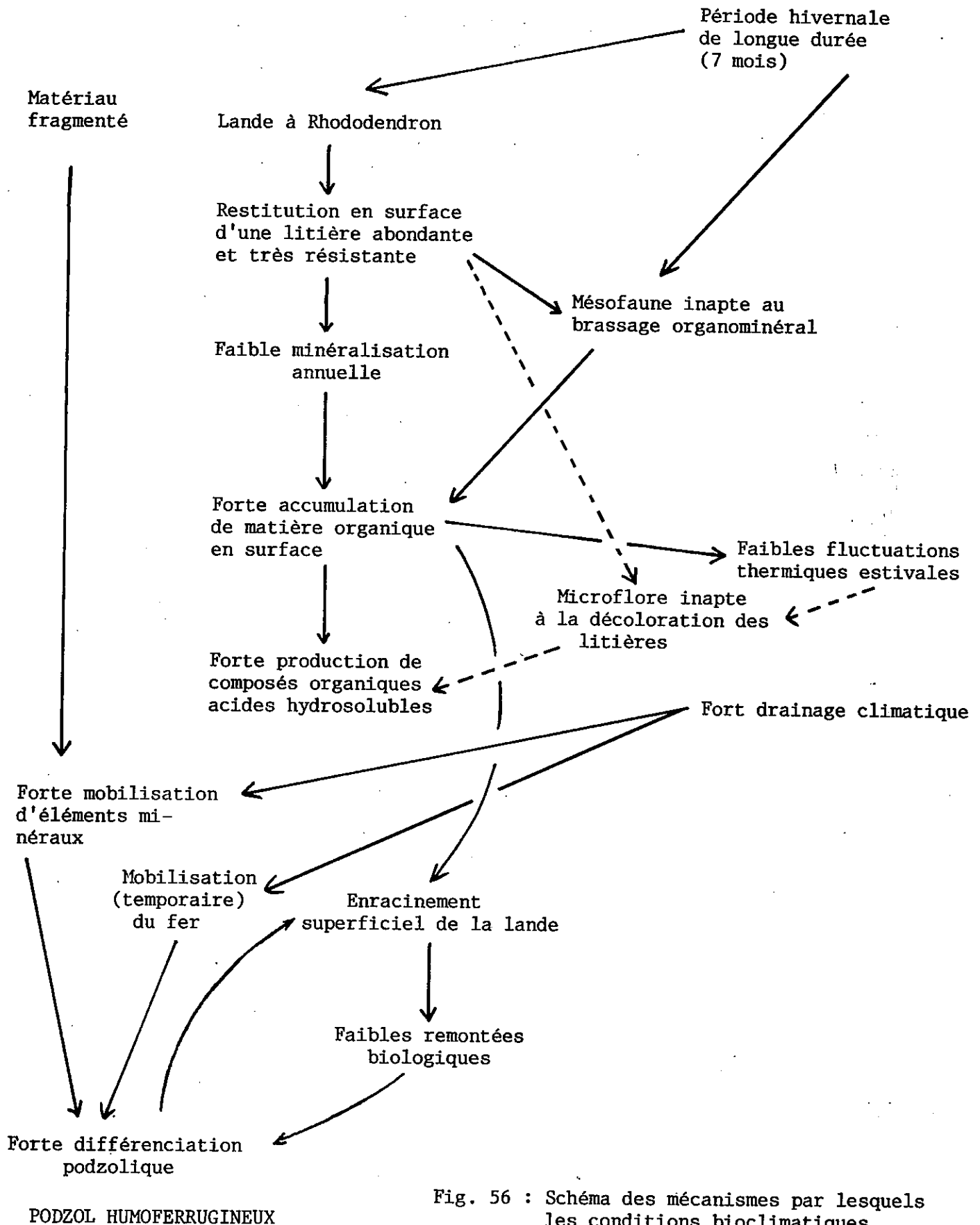


Fig. 56 : Schéma des mécanismes par lesquels les conditions bioclimatiques de l'étage subalpin déterminent la différenciation des podzols



Fig. 57 : Schéma des mécanismes par lesquels les conditions bioclimatiques de l'étage montagnard déterminent la différenciation de sols bruns ocreux.

Trois processus de pédogénèse, d'importance inégale, ont été mis en évidence :

- La nitrification. Son influence, limitée aux formations végétales fixations d'azote, se traduit par la mise en solution de nitrate, de calcium et d'aluminium et leur migration profonde à travers le sol.

- L'hydromorphie. Ce processus, lié à de fortes fournitures hydriques instantanées, apparaît fréquemment, quelle que soit la pente aux étages subalpins et alpins dans du matériau très fragmentés, où, dans des matériaux fragmentés, par suite d'une différenciation pédologique d'horizons jouant le rôle de substrat imperméable. Dans ces positions, il participe largement à la différenciation des sols podzolisés sans cependant, du fait de sa fugacité, marquer profondément les sols.

- La podzolisation. Ce processus majeur affecte, à divers degrés, tous les étages bioclimatiques. Son expression dans la morphologie des sols dépend de la différence entre, d'une part, les flux d'aluminium et de fer, associés au carbone, drainés en profondeur dans les eaux gravitaires et, d'autre part, les flux d'aluminium et de fer ramenés en surface, à partir des horizons profonds, par le cycle biologique.

Cette différence est maximale à l'étage subalpin. La podzolisation s'y exprime d'autant mieux lorsque le matériau est fragmenté et le milieu stable.

A l'étage montagnard la diminution de la fourniture hydrique associée à la forte augmentation des remontées biologiques et à une instabilité périodique s'opposent à l'expression de la podzolisation dans les sols bien qu'elle soit très présente au niveau des processus.

La réduction de la podzolisation à l'étage alpin est modulée par la variété des degrés de fragmentation et des fournitures hydriques.

L'analyse des fonctionnements biogéochimiques effectuée confirme donc et précise les connaissances générales acquises concernant la répartition des pédogénèses en fonction des caractères bioclimatiques du milieu. La prise en compte des cycles d'éléments minéraux nous a fait percevoir la podzolisation sous un jour inhabituel et original. Le rôle fondamental joué par la végétation à travers le pédoclimat qu'elle oriente, la nature de ses restitutions et l'intensité du recyclage biologique qu'elle effectue a été mis en évidence.

Cette voie de recherche, partiellement explorée lors de notre étude, nous semble à même de faire progresser rapidement nos connaissances sur ces milieux complexes et encore mal connus.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ARBEZ M., BONNEAU M., OSTWALD H. (1971) - Etude des problèmes de reboisement à haute altitude : recherches et solutions en Autriche et Suisse. Rapport de mission, CNRF
- AUSSENAC G., BONNEAU M., LE TACON F. (1972) - Restitution des éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans quatre peuplements forestiers de l'Est de la France. Oecol. Plant. Gauthier-Villars 7, 1-21
- BABEL U. (1975) - Micromorphology of soil organic matter, in soils components, vol.1, chap.7, 369-473, Springer Verlag, New-York
- BACHELIER G. (1971) - La vie animale dans les sols in "La vie dans les sols", 1-82, Gauthier-Villars, Paris
- BARTOLI F., JEANROY E. et VEDY J.C. (1981) - Transfert et redistribution du silicium, de l'aluminium et du fer dans les podzols : rôle des composés organiques et des supports minéraux. In : C.R. Coll. Int. "Migrations organo-minérales dans les sols tempérés, Nancy, 24-28 sept. 1979, C.N.R.S.
- BARTOLI Ch. (1966) - Etudes écologiques sur les associations forestières de la Haute-Maurienne. Les Cahiers du Parc de la Vanoise, Bull. n°2
- BARTOLI F., BURTIN G. (1979) - Etude de quatre séquences sol-végétation à l'étage alpin. Documents de cartographie écologique. Vol. XXI, 79-93
- BAUDIERE A. et SERVE L. (1971) - Organisation morphologique et rôle des végétaux dans la dynamique des formations superficielles en milieu supra-forestier. Bull. Soc. Bot. Fr., 118, 77-94
- BELLIÈRE J. (1958) - Contribution à l'étude pétrogénétique des schistes cristallins du Massif des Aiguilles Rouges. Thèse d'Agrég. de l'Ens. Sup. Université de Liège, 198 p.
- BERTHELIN J. (1976) - Etude expérimentale des mécanismes d'altération des minéraux par des organismes hétérotrophes. Thèse Doct. Etat, Univ. Nancy I, 174 p.

BERTHELIN J., SOUCHIER B. et TOUTAIN F. (1979) - Intervention des phénomènes biologiques dans l'altération. Science du Sol, Bull. A.F.E.S., 2-3, 175-187

BERTHELIN J., SADIO S., GUILLET B. et ROUILLER J. (1983) - Altération expérimentale de minéraux argileux di et trioctaédriques dans un podzol et dans un sol brun acide. Sc. Géol. Mém., 71, 13-23

BLET CHARAUDEAU C. (1984) - Caractérisation de la pédogenèse de quelques milieux forestiers par l'étude in situ de l'altération de minéraux tests. D.E.A. de Biologie Végétale. Univ. Nancy I

BONNE M. (1978) - Contribution à l'étude des acides organiques libres de la solution du sol dans deux écosystèmes drainés des Basses-Vosges gréseuses triasiques. D.E.A. Agro-Eco-Pédologie, Univ. Nancy I, 40 p.

BONNE M. (1981) - Variations saisonnières des éléments en solution dans les eaux de gravité et les eaux capillaires de trois sols acides de Lorraine. Thèse Doct. Univ. Nancy I, 64p.

BONNE M., ANDREUX F., VEDY J.C. et SOUCHIER B. (1982) - Etude hydrochimique saisonnière dans trois sols acides. Science du Sol, 4, 275-290

BONNEAU M. et SOUCHIER B. (1979) - Pédologie. Tome II : Constituants et Propriétés des sols, Masson, Paris, 459 p.

BONNEAU M. (1967) - Minéralisation de l'azote de deux sols des Hautes-Vosges. Allure du phénomène et tentatives d'amélioration. Sc. Soc., I, 19-48

BONNEAU M. (1971) - Nouvelles observations sur la minéralisation de l'azote dans deux sols des Hautes-Vosges. Sc. Sol., I 31-46

BOUDOT J.P. (1982) - Relations entre l'altération minérale et le cycle de l'azote sur matériel chloriteux du massif schisto-grauwackeux vosgien. Thèse Univ. de Nancy I, 168 p.

BOUMA J., van der PLAS L. (1971) - Genesis and morphology of some alpine pseudogley profiles. The Journal of Soil Science Vol. 22 n°1

BOUDOU J.P. (1987) - Etude comparée des constituants organiques de l'eau de gravité de deux écosystèmes forestiers des Basses-Vosges gréseuses triasiques. Thèse Doc. Spéc. Univ. Nancy I, 64 p.

BOURRIE G. (1976) - Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO₂ dans les eaux naturelles. Science du Sol, Bull. A.F.E.S., n°3, 141-159

- BOURRIE G., GRIMALDI C. (1979) - Premiers résultats concernant la composition chimique des solutions issues de sols bruns acides sur granite en climat tempéré océanique. Données naturelles et expérimentales. Colloques Internationaux du CNRS, n°303. Migrations organo-minérales dans les sols tempérés.
- BRUCKERT S. (1970) - Influence des composés organiques solubles sur la pédogénèse en milieu acide. Thèse Doct. Etat Univ. Nancy I, In : Ann. Agron., 21, (4), 421-452 et 21 (6) 725-758
- BUURMAN P., SLAGER B., van der PLAS L. (1976) - A toposequence of alpine soils. J. Soil Sci., vol.27, n°3, 395-410
- CABIDOCHÉ Y.M. (1979) - Contribution à l'étude des sols de haute montagne. Analyse des relations sols-milieu dans les Pyrénées Occidentales cristallines et calcaires. Thèse de spécialité. Université de Montpellier, 152 p.
- CADEL G. (1980) - Séries de végétation et sols du subalpin briançonnais sur roches-mères silico-alumineuses. Comparaison avec la Maurienne et la Tarentaise. Science du Sol (4) 249-264
- COLE D.W., RAPP M. (1980) - Elemental cycling in forest ecosystems. Dynamic properties of forest ecosystems Cambridge University Press
- C.P.C.S. (1967) - Classification des sols de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. E.N.S.A. Grignon
- DAMBRINE E. (1981) - Répartition des phénomènes pédologiques sur le Plateau des Saisies (Beaufortain), D.E.A. Pédologie, Paris VII, 50 p.
- DOMMERGUES Y. (1968) - Annales de l'Institut Pasteur 115 n°4, 628-650
- DOMMERGUES Y., MANGENOT F. (1970) - Ecologie microbienne du sol. Masson et Cie édit., Paris, 796 p.
- DUCHAUFOR Ph. (1977) - Pédologie, tome 1 : Pédogénèse et classification, Masson Paris
- DUCHAUFOR Ph. (1952) - Etude sur l'écologie et la sylviculture du mélèze. Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts, t.13, 1
- DURAND R. (1976) - Premiers résultats sur la composition chimique de la solution du sol en milieu brayeux. C.R. Acad. Sc., Paris, 282, 1423-1426
- ESPIAU P., PEYRONEL A. (1977) - Acidité d'échange dans les sols : application à une séquence altitudinale des sols du

Massif du Mont Aigoual. Science du Sol, Bull. A.F.E.S., n°1, 25-44

ESPIAU P. (1978) - Etude d'une série de sols de l'étage montagnard Corse. Contribution de la minéralogie des argiles et de l'acidité d'échange à l'interprétation de la pédogenèse. Science du Sol, Bull. A.F.E.S., n°3, 167-183

ESPIAU P., PEDRO G. (1980) - Caractérisation du complexe d'échange des sols acides. Le taux d'acidité d'échange et sa signification pédogénétique sous climat tempéré. Ann. Agron. 31 (4) 363-383

EVANS L.J., MANLEY E.P. (1983) - Podzol development in northeastern Ontario : Mineralogy and elemental redistribution, 1983, Sci. Geol. Mem. 73, 85-93

FAURIE G. (1977). - Etude in vitro du rôle de la nitrification sur la lixiviation du calcium dans les sols calcaires. Science du Sol, Bull. A.F.E.S., n°4, 207-218

FEDOROFF N., DE KIMPE C.R., PAGE F., BOURDEAU G. (1981). Essai d'interprétation des transferts sous forme figurée dans les podzols du Québec méridional à partir de l'étude micromorphologique des profils. Geoderma 26 25-45

FRANZ H. (1980). - Untersuchungen an alpinen Böden in der Hohen Tavern 1974-1978. Österreichische Akademie der Wissenschaften. Innsbruck

GENSAC P. (1977) - Sols et séries de végétation dans les Alpes Nord Occidentales. Documents de cartographie écologique. Vol. XIX, 21-44

GENSAC P. (1977). - Sols et groupements végétaux de la zone des schistes lustrés dans l'étage alpin (combe de l'Iseran-Val Prarion). Travaux scientifiques du Parc National de la Vanoise. VII, 29-40

GIRAULT P. (1984) - Transformations des phyllosilicates au cours de la pédogenèse des sols podzolisés humifères du Plateau de Millevaches. Thèse 3ème cycle, Univ. Poitiers, 105 p.

GUBLER Y. (1976) - Aspects de certains reliefs de la Vallée de Chamonix. Publication de la Réserve des Aiguilles Rouges

GUELLEC I. (1982). - Evolution comparée d'un sol brun acide de l'étage montagnard moyen des Vosges dans deux écosystèmes forestiers feuillu et résineux. Science du Sol, 1 p. 55-70

GUILLET B., ROUILLER J., SOUCHIER B. (1975) - Podzolisation and clay migration in Spodosols of Eastern France. Geoderma 14, 3, 223-244

HEINRICHS H., MAYER R. (1977) - Distribution and Cycling of Major and Trace Elements in Two Central European Forest Ecosystems. 402 J. Environ Qual., Vol. 6, n° 4

HUTTERMANN A., ULRICH B. (1984) - Solid phase-solution-root interactions in soils subjected to acid deposition. Phil. Trans. R. Soc. Land. B. 305, 353-368

JAMIER D., HAUBERT M., OLIVE Ph. (1972) - Origine météorique des eaux circulant en profondeur dans le massif granitique du Mont-Blanc. C.R. Acad. Sci. Paris, t.275, 1593-1596

JEANROY E. (1983) - Diagnostic des formes du fer dans les pédogénèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mossbauer. Thèse Nancy, 168 p.

JUSTE C. (1966) - Redistribution de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique. Ann. Agron. 17 (2) 272-301

KUBIENA W.L. (1953) - The soils of Europe London, ed. Murby & Co.

LABROUE L. (1976) - Etude écologique des sols alpins du Pic du Midi de Bigorre. Thèse doc. Etat. Toulouse

LEGROS J.P. (1975) - Occurrence des podzols dans l'Est du Massif Central. Sc. du Sol., n°1

LEGROS J.P., CABIDOCHÉ Y.M. (1977) - Les types de sols et leur répartition dans les Alpes et les Pyrénées cristallines Doc. de cartographie écologique, vol. XIX, 1-19

LEGROS J.P., ROBERT M., van OORT F. (1980) - Caractères principaux de la pédogenèse sur calcshistes en montagne. Science du Sol n°4, 297-312

LEROY LADURIE E. (1983) - Histoire du climat depuis l'an mil. Flammarion, 2 tomes

LIKENS G.E., BORMANN F.H., JOHNSON N.M., FISHER D.W. and PIERCE R.S. (1970) - Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. Ecological monographs, Vol. 40, n°1, 23-47

LOSSAINT P. (1959) - Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. Ann. Agron. 4, 369-415 et 5, 493-543

LUNDEGARDH H. (1927) - Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. Soil Sci., 23, 417-453.

MANGENOT M.F. (1966) - Etude microbiologique des litières. Bull. de l'ENSAIA, t. VIII, II, 113-125

MATTHEY W., DETHIER M., GALLAND P., LIENHARD C., ROHRER N., SCHIESS T. (1981) - Etude écologique et biocénotique d'une pelouse alpine du Parc National Suisse. Bulletin d'Ecologie t.12, 4, 339-354

MEHRA O.P. and JACKSON M.L. (1960). - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate-bicarbonate system buffered with sodium carbonate.. Clays and clay minerals, 7, 317-327.

MENUT C. et CHRETIEN J. (1973). - Exemple de podzolisation chimique : les sols sur cailloutis de la forêt de Chaux (Jura) - Sc. du Sol - Bull. de l'A.F.E.S. n°1, 17-32.

METZER (1956) - Alpine soils of the rocks Mountains. J. Soil Sci. 7, 22-33

MEYER (1964) - The role of the fungus *Cenococcum graniforme* (Sow.) Ferd. et Winge in the formation of mor. in Soil micro-morphology, Proceedings of the end international working-meeting on soil micromorphology, Arnhem, 22/IX - 25/IX 1964, ed. A. Jongerius. Elsevier, Amsterdam, 23-31 + 1 planche hors texte

MONTCOUYOUX A. (1976) - Recherches microbiologiques sur quelques sols d'altitude. Thèse 3ème cycle, Univ. Grenoble

NEUWINGER I. (1967) - Böden der Subalpinen und alpinen Stufe in den Tiroler Alpen. Mitt. Ostalp. din Ges. f. Vergethde, 11, 135-150

NYS C., PATERNOSTER M., VEDY J.C. (1979) - Transfert et redistribution des éléments en solution par les eaux de gravité de deux écosystèmes feuillus et résineux. Colloques internationaux du CNRS n° 303 Nancy

PALLMANN H. (1947) - Pédologie et phytosociologie. Conférence de Pédologie Méditerranéenne. Alger - Montpellier A.F.E.S.

PATERNOSTER M. (1981) - Colonisation par la végétation et pédogénèse initiale sur les moraines latérales historiques du grand glacier d'ALETSCHE. Thèse de spécialité, Nancy

PELISSONNIER C. (1978) - Quelques aspects de la pédogénèse à l'étage alpin et subalpin. DEA - INA Paris VI, Paris VII

PONGE J.F. (1984) - Etude écologique d'un humus forestier par l'observation d'un petit volume. Rev. Ecol. Biol., vol. 21, 161-187

RANGER J., ROBERT M. (1985) - Caractérisation du fonctionnement physicochimique des sols forestiers par une approche expérimentale utilisant l'évolution des minéraux primaires.

Agronomie 5 (2), 157-168

LE RIBAUT L. (1977) - L'exoscopie du quartz - Masson 150 p.

RICHARD L. (1975) - Carte écologique des Alpes au 1/500000è - Feuilles de Cluses et Chamonix - Doc. de Carto. écologique, XVI, 65-96

RICHARD L. (1975) - Etude écologique des Massifs des Aiguilles Rouges, du Haut-Giffre et des Aravis (Haute-Savoie). Le Milieu et la Végétation. Ann. du Centre Universitaire de Savoie. Tome spécial 1-100

RIGHI D. (1977) - Génèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des landes du Médoc. Thèse Univ. de Poitiers, 145 p.

ROBERT M., TESSIER D. (1974) - Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. Ann. Agron. 25 (6), 859-882

ROBERT M. (1975) - Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. Ann. Agron. 26 (4) 363-399

ROBERT M., VICENTE M.A. (1977) - Influence de la concentration en acides organiques sur l'altération des micas (aspects qualitatif et quantitatif). C.R. Ac. Sc., 284, série D, 511-514

ROBERT M., EYRALDE J., BERRIER J., PELISSONNIER C. (1979) - Illustration du rôle des êtres vivants dans l'altération et la pédogenèse à l'étage alpin et subalpin. Ann. de l'Univ. de Savoie, t.4, 23-25

ROBERT M., CABIDOCHÉ Y.M., BERRIER J. (1980) - Pédogenèse et minéralogie des sols de haute montagne cristalline. Science du Sol n°4, 313-336

RODIN, BAZILEVITCH (1967) - Production and mineral cycling in terrestrial vegetation. Oliver & Boyd. Londres

SNEDDON J.C. (1972) - The morphology and genesis of some alpine soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol.36, n°1

SOUCHIER B. (1971) - Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard. Thèse Doc. Etat Nancy A.O. 5277

SPALTENSTEIN H. (1984) - Pédogénèses sur calcaire dur dans les Hautes Alpes calcaires. Thèse, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

TAMM O. (1922) - Om bestämning av de oorganiska komponenterna i markens gel Komplex. Medd Stratens Slogsförsökst, 19, 385-404

TAMURA T. (1958) - Identification of clay minerals from acid soils. Jour. Soil Sci., 9, 141-147

TOUTAIN F. (1974) - Etude écologique de l'humification dans les hêtraies acidiphiles. Thèse Univ. Nancy, 124 p.

TOUTAIN F. (1981) - Les hivers forestiers (R F F XXXIII, 6, 449-477

TROSSET L. (1980) - Les sols sur micaschistes. Science du Sol n°4, 313-336

van BREEMEN N., MULDER J., DRISCOLL C.T. (1983) - Acidification and alkalization of soils. Plant and Soil, 75, 283-308

van MIGROET H., COLE D.W. (1982) - Effects of acid rain on the soil nutrient status and solution acidity. Technical bulletin n°390 National council of the paper industry for air and stream improvement

van OORT F. (1984) - Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse. Thèse Doc. Ing., I.N.A., 280p.

VEDY J.C., ROUILLET J., MERLET D. (1978) - Les solutions de sol dans deux écosystèmes des basses Vosges gréseuses. C.R. ATP Hydrogéologie, Montpellier

VERGER J.P. (1974) - Sols et végétation de l'étage alpin sur schistes lustrés et roches vertes en Queyras (H.A.). Thèse de spécialité Université de Grenoble, 131 p.

VEYRET P. (1959) - L'eau, la neige, la glace dans la formation du modelé de la Vallée de Chamonix. Revue de géographie alpine, tome LVI, f.1

VEYRET P. (1968) - L'épaulement de la vallée glaciaire. A partir de la Vallée de Chamonix, une nouvelle conception du problème. R.G.A. Vol. 56, 43-65

VINCENTE M.A., RAZZAGHE M., ROBERT M. (1977) - Formation of aluminium hydroxy vermiculite (intergrade) and smectite from mica under acidic conditions - Clay Minerals, 12, 101-112

WAREMBOURG F. (1969) - Séquence évolutive altitudinale dans le Massif de L'Aigoual - Thèse de 3è cycle - Université de Montpellier 142 p.

WAREMBOURG F., LOSSAINT P., BOTTNER P. (1973) - L'évolution des sols dans une séquence méditerranéo-montagnarde sur roche-mère siliceuse : Massif du Mont-Aigoual - Bull. de l'A.F.E.S. n°1, 49-61

ANNEXES

ANNEXE 1

Profils types et analyses correspondantes

Type de sol : Ranker d'éboulis alpin à pavage et concentrations de fines en surface.

N° de profil : I 72

Localisation : combe des Crochues - Aiguilles Rouges

Forme de relief : milieu de pente d'éboulis actif de Gneiss pyriteux

Altitude : 2400 - Pente forte - Orientation S

Végétation : nulle.

0-5 : couche de cailloux de Gneiss pyriteux à revêtements d'oxyde de Fer, disposés en tout sens, propres.

5-7 : transition par une zone de cailloux plus fine, propre.

7-15 : A1 : brun, accumulation de graviers revêtus brunâtre, revêtements bruns, très fins sur les faces supérieures et inférieures des graviers, dépôts de fines et graviers associés sur la face supérieure des éléments grossiers, en structure vaguement lamellaire parallèle à la pente, très meuble, transition rapide.

15-35 : B1 : brun vif coloré, nombreux graviers et cailloux, les éléments grossiers devenant de plus en plus abondants vers le bas, sont revêtus uniformément brun jaunâtre et portent sur leurs faces supérieures des coiffes constituées de graviers et de fines, la face supérieure des dépôts montre des graviers dont l'extrémité affleurante n'est pas revêtue, nombreux vides intergraviers, peu de vides d'entassement intercailloux.

35-80 : B2 : brun jaunâtre, très nombreux cailloux et blocs montrant des coiffes, vides d'entassements intercailloux et blocs très nombreux et non comblés.

Type de sol : Ranker ocreux d'éboulis alpin

N° du profil : I 71

Localisation : Combe des crochues - Aiguilles Rouges

Forme de relief : partie supérieure d'un éboulis actif de Gneiss pyriteux

Altitude : 2400 - Pente forte - Orientation S

Végétation : pelouse déchirée à Clamagrostis tenella

0-5 cm A1 : mat racinaire dense, brun foncé incorporant de nombreux graviers.

5-15 cm B5 : brun jaunâtre coloré. Structure micro-agrégée bien exprimée. Très nombreuses racines. Très nombreux cailloux et graviers sales sans dépôts : face supérieures et inférieures identiques.

15-55 B2 : brun jaunâtre moins vif. Structure grumeleuse à polyédrique subanguleuse. Assez nombreuses racines fines verticales à obliques. Très nombreux cailloux et graviers revêtus d'un enduit brunâtre. Dépôts fins et grossiers à structure parallèle à la pente sur la face supérieure des éléments grossiers (coiffes).

55-80 B3 : brun jaunâtre. Très nombreux éléments grossiers avec dépôts (coiffes) et plus sur les faces supérieures et délimitant de nombreux vides d'entassement (cavernes).

NB : l'horizon ocreux existe sur des éboulis non pyriteux.

Horizon	M %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexes absorbant mg/100 g					
		A	LP	LG	SP	SG		MO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A1	38	119	140	87	188	4,66	4,9	106	62	4,7	13	2,1	0,76	0,42	0,04		13,6
B1	23	104	142	105	220	429	5,1	52	3	2,2	13,7	0,3	0,15	0,15	0,03		8,4
B3	13	79	130	100	168	523	5,5	22	13	0,8	15,8	0,2	0,05	0,06	0,02		2,5
Horizon	Al %/..					Fe %/..							Si CBD				
	OX	CBD	Tamm	Total		Tetra	Pyro	OX	CBD	Dab	Total						
A1	1,92	1,75	2,9	72,8		0,34	2,81	4,84	7,75		39,9		0,4				
B1	3,36	3,55	4,1	81,8		0,85	5,26	8,6	14,45		51,2		0,42				
B3	2,32	2,43	3,6	85		0,09	1,41	4,08	8,9		51,3		0,12				

Type de sol : ranker Alpin

N° du profil : P17

Localisation : Col du Brévent

Forme de relief : Roches moutonnées

Altitude 2500 - Pente forte - Orientation N

Végétation curruletum

0-5 cm A11 : gris brun très sombre - limon sableux - enracinement très dense - structure en grumeaux arrondis - pas d'éléments grossiers

5-18 cm A12 : brun sombre - structure grenue - très nombreuses racines peu d'éléments grossiers - très micacé

18-35 A13 : brun sombre - très micacé structure massive - assez nombreux graviers et cailloux

35 R : Gneiss riche en biotite

Horizon	H %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO %	C %	N %	C/N	Ca	Hg	K	Na	S	T
A 11		276	260	47	150	259	4,5	214			14,4	1,1	0,61	0,49	0,05		26,6
A 12		209	247	118	191	235	4,4	139			17,4	0,5	0,28	0,23	0,07		22,8
A 13		150	231	107	207	305	4,6	100			14,7	0,3	0,10	0,075	0,03		22,8
Horizon	Al %/..					Fer %/..											
	OX	CBD	Tamm Arras	Total		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total						
A 11			5,6	72						12,8	27,3						
A 12			10,1	78						14,5	30,6						
A 13			10	86						22,3	44,5						

Type de sol : Sol noir d'apport éolien

N° du profil : I59

Localisation : Tête sur les lacs - Aiguilles Rouges

Forme de relief : chaos de blocs

Altitude : 2500 - Pente nulle - Orientation SE

Végétation : Combe à neige à Polytrichum sexangulare

- 0-10 A11 : gris noirâtre - parties de polytrich morts entassés évoluant vers un matériau plus transformé peu reconnaissable en profondeur grains minéraux visibles - peu d'éléments grossiers - Structure lamellaire à fibreuse en surface.
- 10-35 Bg : gris foncé - surstructure polyédrique anguleuse nette grossière - sous structure massive - Sur les faces des polyèdres marbrures rougeâtres d'hydromorphie en profondeur opposition de blocs uniformément enduits rougeâtre.
- R : Gneiss dur recouvert d'un enduit rougeâtre

Horizon	H %	Granulométrie %					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g										
		A	LF	LG	SF	SG		MO %	C %	N %	C/N	Ca	Hg	K	Na	S	T					
dépôt/ névé		298	307	161	215	19		194	113		12,1											
A 11	71	320	295	165	167	53	4,5	171	100	7,4	13,5											
Bg	57	312	280	174	174	60	4,7	130	75	4,5	16,9											
Horizon	Al %/..											Fe %/..										
	OX	CBD	Tamm Arras		Total		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total										
A 11				70,7								17,3										
Bg			4,8	78,2								24,7										

Type de sol : ranker hydromorphe.

N° du profil : B1

Localisation : Lac du Brévent - Aiguilles Rouges.

Forme de relief : microthalweg dans les Gneiss moutonnés.

Altitude : 2150 - Pente faible - Orientation N

Végétation : Curruletum.

0-5 : A11 : brun foncé, structure massive à sous-structure grumelleuse, matériau très fin micacé, sans éléments grossiers, assez nombreux racines.

5-10 : A12 : brun rouille foncé, surstructure massive, sous-structure lamellaire grossière, nombreux sables et graviers altérés ocre, peu de racines.

10-35 : A13 : brun sombre à noir, structure lamellaire très fine, pas d'éléments grossiers, matériau fin micacé, peu de racines.

35-55 : A14 : brun rouille foncé, moins organique, très nombreux graviers et sables altérés, natte de racines fines à la base.

55 : R : Gneiss moutonné altéré rouille en surface.

Horizon	H %	Granulométrie					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO %	C %	N %	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A 11	158	192	190	129	206	283	4,9	113,8	66,2	4,2	15,8	0,3	0,12	0,14	0,05		19,3
A 12	114	164	192	129	262	253	4,9	105,9	61,6	3,39	18,2						
A 13	408	210	404	169	159	58		184,7	107	4,7	22,75						23
A 14	31	54	150	137	309	350	5	39	22,7	1,24	18,3	0,2	0,02	0,03	0,016		12,1
Horizon	Al %..					Fer %..											
	OX	CBD	Tamm	Total	Arras	Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total						
A 11										11,9							
A 13										5,9							
A 14			5,2	80,3						1,05	42,8						

Type de sol : sol ocre podzolique à moder alpin.

N° du profil : I 51.

Localisation : l'Index Aiguilles Rouges.

Forme de relief : dépôt fragmenté sur une bosse de Gneiss moutonné en pied d'éboulis.

Altitude : 2350 - Pente nulle - Orientation S-SE.

Végétation : curruletum dense, quelques pieds de Vaccinium Uluginosum.

0-4 : A0 : mat racinaire dense enserrant des microboulettes brun foncé.

4-10 : A1/A2 : gris clair, assez net, enracinement assez faible, texture fine, quelques graviers.

10-14 : Bh : brun rougeâtre sombre, structure micro-agrégée nette, très nombreuses racines, assez nombreux éléments grossiers.

14-30 : BS : ocre, structure micro-agrégée très nette, nombreuses racines, assez nombreux gros blocs.

30-50 : BC : brun jaune entre gros blocs de Gneiss.

50 : R : Gneiss compact.

Horizon	N°	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A 1/A 2	49	204	216	147	186	247	4,4	185	108	5,8	18,5	0,4	0,2	0,25	0,05		21,7
Bh	94	220	235	118	151	276	4,7	176	102	6,1	16,8	0,2	0,13	0,187	0,038		35
BS	55	147	207	136	188	322	4,9	87	51	3	17	0,2	0,07	0,105	0,026		25,4
Horizon	Al %/..					Fe %/..					Si						
	OX	CBD	Tamm	Total	Arras	Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total	CBD					
A 1/A 2	3,8	3,3	4,6	64		0,81	5,13	6,88	10,3		18,7		0,32				
Bh	10,4	10,1	12,7	68		2,25	30,2	36,24	38,3		62,5		0,25				
BS	10,3	10	8,4	75,4		1,28	25,5	29,68	29,12		52,6		0,12				

Type de sol : Sol podzolique à Bh profond

N° du profil : I₅₄

Localisation : Balise Nivose - Aiguilles Rouges

Forme de relief: micro-éboulis dans une gouttière entre les Gneiss moutonnés

Altitude : 2400 - Pente faible - Orientation S.E.

Végétation : pelouse déchirée intermédiaire entre éboulis et combe à neige.

0-1 : A0 : mat racinaire assez dense.

1-15 : A1 : brun foncé, structure micro-agrégée, très nombreuses racines fines, assez nombreux graviers, quelques blocs.

15-25 : BS : ocre foncé, structure micro-agrégée, peu d'éléments grossiers, assez nombreuses racines.

25-50 : Bh : brun foncé, structure grumeleuse à micro-agrégée meuble, très nombreux éléments grossiers enduits brun foncé.

50 : R : Gneiss raboté, humide, natte de racine au contact de la dalle.

Horizon	H %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière organique					Complexe absorbant meq/100 g				
		A	LF	LG	SF	SG		MO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A 1	38	134	147	135	245	339	4,6	130	75,4	5,43	13,9	0,4	0,17	0,44	0,04		18
BS	106	153	280	170	183	214	4,8	164	95	6,03	15,8	0,2	0,07	0,14	0,02		33
Bh	59	154	230	148	175	293	4,8	131	76,3	5,3	14,4	0,2	0,06	0,13	0,03		23,5
Horizon	OX	Al %/..					Fer %/..					Si CBD					
		CBD	Tamm	Total	Arras		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total					
A 1	3,16	3,05	4,3	60,5		0,77	4,5	6,24	8,82		28,6	0,67					
BS	12,8	12,5	14,9	61,8		4,68	23,3	29,7	27,6		45,6	0,57					
Bh	10,48	10,4	10,9	68,7		2,3	15	15,7	18,2		39,4	0,35					

Type de sol : Ranker à MOR

n° du profil : I62

Localisation : La Remua (Aiguilles Rouges)

Forme de relief : barre de gneiss moutonnée en pente très faible

Altitude : 2050 Pente : très faible Orientation : E

Végétation : Crête ventée à azalée naine

- 0 - 6 cm Ao_1 brun rougeâtre structure fibreuse.
- 6 - 15 cm Ao_2 gris foncé, structure fibreuse à massive, présence de grains, minéraux lavés.
- 15 - 30 cm Ao_3 noir, surstructure massive soustructure fibreuse fine.
- 30 R dalle cristalline desagrégée sur quelques millimètres.

Horizon	H	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO%/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
Ao ₁	120						4,4	717	417	18,7	22,3						56
Ao ₂	124	200	427	335	31	7	4,4	797	467	11,9	39	1,5	0,16	0,1	0,09		58,7
Ao ₃	157	257	478	190	46	34	4,3	701	408	15	27,2	2,7	0,49	0,14	0,13		46,7
Horizon	Al %/..					Fe %/..							Si				
	OX	CBD	Tam Arres	Total		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total		CBD				
Ao ₁																	
Ao ₂	7,84	7,57	8,3	22,4		1,37	3,35	4,04	3,9		5,3		0,15				
Ao ₃			4,3	19,1							2,4						

Type de sol : Podzol humifère

n° du profil : I 65

Localisation : les Deviets (Aiguilles Rouges)

Forme de relief : crête de moraine

Altitude : 2100 Pente : faible Orientation : S.E.

Végétation : Crête ventée à azalée naine

0 - 15 cm	Ao	Mor de crête ventée, brun rougeâtre à structure fibreuse avec quelques zones à microboulettes, en transition, liséré noirâtre.
15 - 18 CM	A ₂	grisâtre discontinu en liséré
18 - 30 cm	Bh	brun très foncé très nombreux éléments grossiers revêtus de noir, structure polyédrique subanguleuse assez dure.
30 - 45 cm	Bs ₁	brun rougeâtre très nombreux éléments grossiers revêtus, structure polyédrique subanguleuse à lamellaire faiblement indurée
45 - 60 cm	Bs ₂	ocre, matériau identique mais moins induré.
60 cm	Bc	gris jaunâtre, matériau morainique compact à coiffes hétérogènes sur les éléments grossiers.

Horizon	H %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SP	SG		HO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
Ao	142						4,1	741	431	19,9	21,7						
A ₂	35	114	282	189	183	232	4,3	96,4	56,1	1,9	29,7	0,4	0,1	0,11	0,02		14,4
Bh	125	201	220	137	165	277	4,6	17,3	100,6	4,23	23,8	0,3	0,07	0,07	0,02		43,9
Bs ₁	126	137	150	122	177	414	5,1	96,8	53,3	1,84	30,6	0,1	0,03	0,03	0,01		31,2
Bs ₂	64	65	146	116	195	478	5,4	37,4	21,8	0,94	23,2	0,1	0,04	0,04	0,02		10,2
Horizon	Al %/..					Fe %/..					Si CBD						
	OX	CBD	Tamm Arras	Total		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb		Total					
A ₂	1,52	1,44	1,9	55,6		0,49	0,95	0,72	2,32		7,5		0,4				
Bh	8,36	7,95	12,1	57,8		2,71	7,62	14,7	15,65		35,9		0,12				
Bs ₁	28,32	21,85	25,5	76,5		1,72	9,57	25,04	22,35		48,9		1,75				
Bs ₂	17,12	9,64	18,7	83,1		0,38	2,67	9,12	11,65		41,1		0,7				

Type de sol : Stagnogley podzolique soliflué
 N° du profil : L 102
 Localisation : les Marmottons - Lognan - Massif du Mont-Blanc
 Forme de relief : dépôt morainique glissé soliflué
 Altitude : 2200 - Pente forte - Orientation NW
 Végétation : combe à neige à Alchemilla Pentaphyllea.

- 0-1 : A0 : mat racinaire.
 1-5 cm : A1g : brun, structure massive, sous-structure micro-agrégée moyenne, LS, peu d'éléments grossiers, quelques minéraux apparaissent lavés, quelques gainages racinaires.
 5-10 cm : B8g : brun ocre, LS, structure micro-agrégée moyenne, pas d'éléments grossiers, nombreux gainages racinaires.
 10-35 : B2g : brun jaune, LS, structure lamellaire fine, quelques gainages racinaires.
 35-40 : B3 : brun jaune, plus sableux et plus nombreuses traces d'hydromorphie, quelques éléments grossiers.
 40-55 : A2g : beige clair, plus sableux, nombreuses taches rouille, structure polyédrique subanguleuse moyenne, éléments grossiers plus nombreux.
 55-90 : Bhg : brun coloré, structure grumeleuse à polyédrique moyenne, assez nombreux gainages racinaires surtout à la partie supérieure, de plus en plus graveleux en descendant.

Horizon	H %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		HO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A1g	29	122	367	203	183	125	4,7	83	48	3,7	13,1	0,5	0,3	0,58	0,04		12,2
B8g	21	111	344	198	176	171	5	37	21	1,6	13,1	0,2	0,1	0,24	0,03		9,2
B2g	19	141	409	169	172	109	5,2	20	12	0,9	13,5	0,1	0,04	0,11	0,017		7,6
Horizon	Al %/..				Fe %/..												
	OX	CBD	Tans	Total	Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total			Si				
A1g	1,76	1,59	2,9	65		0,85	2,82	4,24	5,45	29			0,5				
B8g	2	2,09	3	74,4		2,02	4,37	5,32	6,55	31,5			0,35				
B2g	2,48	2,46	3,6	82,8		0,94	4	5,04	6,95	82,1			0,3				

Type de sol : Podzol ferrugineux

N° du profil : LR 9

Localisation : les Jeurs (Lognan) Massif du Mont-Blanc

Forme de relief : colluvions en pente très forte

Altitude : 1900 - Pente forte - Orientation NW

Végétation : Mélèzin à Aulne vert et laitue des Alpes (Megaphorbiaic)

0-2 cm A0/A1 : brun fragments végétaux non reconnaissables sous un tapis d'aiguilles et de mousses. Grains minéraux lavés.

2-40 A2 : gris clair hétérogène avec des bandes plus jaunâtres. Texture LS avec certaines zones plus sableuses. Structure lamellaire assez fine peu nette. Nombreuses grandes dalles de schiste cristallin parallèles à la pente. Transition diffuse (5 cm) par un matériau ocre.

40-80 Bs : brun ocre. Plus argileux. Structure polyédrique anguleuse nette peu ferme avec traces de lessivage bruns à bruns foncés en descendant sur les faces. Nombreuses dalles parallèles à la pente revêtues. Transition diffuse.

Bc : brunâtre + sableux. Nombreux éléments grossiers et graviers. Quelques gainages racinaires dans des poches de texture plus fine. Structure polyédrique anguleuse ferme nette.

Horizon	N°	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant seq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A0/A1	20						4,6	89	51,8	3,95	13,45						
A2	9	65	271	193	204	267	4,8	9,2	5,4	0,35	15,42						5,5
Bs	47	34	236	247	247	236	5,1	24,7	14,4	0,68	21,17						13,3
Bc	12	29	155	167	198	451	5,2	9,8	5,7								5,7
Horizon	Al %/..					Tetra	Fe %/..					Si CBD					
	OX	CBD	Tamm	Total	Argas		Pyro	OX	CBD	Deb	Total						
A2			1,5	59,7						1,9	8,2						
Bs			5,8	58,3						15,4	22,5						
Bc			2,9	73						10,3	24,2						

Type de sol : Podzol humoferrugineux

N° du profil : LR₂

Localisation : Lognan, Massif du Mont Blanc

Forme de relief : Crête morainique en pente faible

Altitude : 1950 m, pente faible, orientation NW

Végétation : lande à camarine noire, Rhododendron chétif

0 - 6	Ao	Mor
6 - 20	A ₂	irrégulier, gris blanchâtre, texture SL, structure lamellaire parallèle à la pente, peu nette sous structure particulaire, assez nombreux graviers, quelques cailloux altérés, transitions brutales
20 - 25	Bh	noir ondulé, structure lamellaire fine sous structure micro-agrégée, nombreuses racines
25 - 40	Bs ₁	brun rougeâtre induré, structure lamellaire nette, l'intérieur des lamelles est rougeâtre, la face extérieure est enduite de noir
40 - 50	Bs ₂	matériau gris jaunâtre à bandes ocres, parallèles à la pente et autour des éléments grossiers, très nombreux vides d'entassement intergrains, transitionnés par un zone identique sans bandes ocres
50	Bc	matériau morainique gris jaunâtre à taches blanches avec de nombreuses coiffes hétérogènes sur les faces amont des éléments grossiers.

Horizon	N °	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		HO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
Ao	124						4.2	527	306	15.7	19.5						
A ₂	14	60	192	177	308	263	4.4	38	22	0.92	24						
Bh	37	70	157	141	319	313	4.7	56.2	32.7	2	16.4						
Bs	26	36	169	152	286	357	5.1	22.8	13.3								
BC	4	32	177	136	264	391	5.6										
Horizon	Al %/..					Fe %/..					Si CBD						
	OX	CBD	Tetra Arras	Total		Tetra	Pyro	OX	CBD					Deb	Total		
Ao																	
A ₂			1	64.4						1	7.4						
Bh			5	63.4						14.6	26						
Bs			6.5	67						9.4	24						
BC			1.9	70						2.6	20						

Type de sol : Sol ocre podzolique

N° du profil : I₆₃

Localisation : La Chavanne

Forme de relief : pente de moraine à microrelief en gradins

Altitude : 1850 - Pente forte : Orientation : S

Végétation Nardaie sèche à Canche flexueuse envahie par les Genevriers

0 - 2	A0	mat racinaire dense de graminées.
2 - 15 cm	A ₁	brun structure polyédrique subanguleuse fine à grumeleuse (0,5 cm) nombreux grains minéraux lavés. quelques éléments grossiers très nombreuses racines.
15 - 30 cm	Bh	brun vif, structure microagrégée, quelques éléments grossiers en tout sens, très meuble, nombreuses racines fines.
30 - 50 cm	Bs	Ocre vif, épaisseur variable entre 10 et 30 cm, assez nombreux éléments grossiers en tout sens. Structure micro-agrégée meuble. nombreuses racines fines.
50	Bc	Gris jaunâtre, matériau morainique compact nombreux éléments grossiers intégrés dans une structure massive et friable. Quelques très fins revêtements ocres en bordure des éléments grossiers.

Horizon	M &	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A ₁	63	141	223	104	153	379	4,7	343	200	12,24	16,3	3,8	1,3	0,97	0,03		19,8
Bh	35	96	149	118	222	415	5,1	76	44,3	2,79	15,9	0,4	0,12	0,132	0,02		13,9
Bs	43	55	78	51	163	653	5,4	36,6	21,3	0,94	22,6	0,2	0,04	0,05	0,014		13,3
Bc	8	24	67	63	146	700	5,6	12,3	7,2	0,31	23,2	0,1	0,01	0,02	0,003		0,9
Horizon	Al %/..					Fe %/..					Si CBD						
	OX	CBD	Tamm Arras	Total		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total						
A ₁	1,6	1,45	2	44,8		0,28	3,1	3,64	4,6		14,8						
Bh	5,36	5,05	6,6	70,1		1,6	5,49	6,12	7,05		27,1						
Bs	9,2	8,42	9,2	73,2		1,81	7,31	9,16	9,02		26,8						
Bc	3,28	2,82	3,8	74,1		0,07	0,58	1	1,27		22,8						

Type de sol : sol brun cryptopodzolique

n° du profil : P 801

Localisation : col des Montets

Forme de relief : pied d'éboulis parcouru par des avalanches.

Altitude : 1450 Pente forte Orientation : W

Végétation : Aulnaie verte à épilobe

0 - 4 cm	Ao	moder, grains minéraux peu visibles, éléments grossiers en surface.
4 - 15 cm	A ₁	brun nombreuses racines et débris végétaux homogènes irréguliers, texture sabolimoneuse, structure polyédrique subanguleuse, quelques éléments grossiers
15 - 45 cm	A ₁ B	brun jaunâtre sombre, structure polyédrique subanguleuse, quelques éléments grossiers. très nombreuses racines, texture limonosableuse.
45 - 90 cm	Bs	brun jaunâtre, structure polyédrique, nombreux éléments grossiers, peu de racines.
90 cm	BC	brun jaune, structure polyédrique, nombreux éléments grossiers, très meuble et friable, aucune racine.

Horizon	H	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		HO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
A ₁		168	212	165	245	210	4,8	104			12,4						
A ₁ B		122	224	154	204	296	4,8	38			1,4						
Bs		63	184	147	310	296	5,3	19			0,9						
BC		32	131	164	383	290	5,3										
Horizon	Al %/..				Fe %/..				Si				CBD				
	OX	CBD	Tamm	Total	Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total							
A ₁			5,3	71					11,2	22,7							
A ₁ B			4,9	76					12,6	25,9							
Bs			6,3	85					12,2	21,8							
BC			4,4	77					7,1	21,2							

ANNEXE 2

Données analytiques correspondant aux sols des 4 stations étudiées

NIVOSE

Horizon	H %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant eqg/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO°/..	C°/..	N°/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T
Al	75	225	259	133	145	238	4.4	431.2	250.7	13.32	18.8	1.8	0.61	0.52	0.06	3	30.4
Bh	111	277	186	128	139	270	4.7	278.4	161.9	6.48	25	0.1	0.05	0.095	0.021	0.26	28.3
Horizon	OK	Al°/..				Fe°/..				St							
		CBD	Terra	Total		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total		CBD				
Al	3.72	3.79	4.5	41.3		1.02	5.3	5.64	8.5	10.4	15.7		1.12				
Bh	11.2	11.4	11.9	59.1		1.52	10.6	10.72	13.9	16.8	26.6		0.32				
R	3			76.1							26.9						

BALME

Horizon	H %	Granulométrie %				pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g				
		λ	IF	LG	SF	SG	MO %	C %	N %	C/N	Ca	Mg	K	Na	S
A1	80	254	364	141	101	140	3.9	410.3	238.6	17.48	13.64	1.5	0.78	0.778	0.11
A2	30	231	308	158	115	188	3.8	94.9	55.2	5.47	10.1	0.4	0.32	0.296	0.06
Bs	37	177	230	125	121	347	4.3	71.8	41.8	4.16	10	0.1	0.09	0.13	0.05
Bc	17	77	158	104	128	533	4.9	25.4	14.8	1.7	8.7	0.1	0.01	0.03	0.01
Horizon	Ox	Al %				Fe %				S1 CBD					
		CBD	Tam	Total		Tetra	Pyro	Ox	CBD	Deb	Total				
A1	2	1.89	2.3	36.7		0.48	2.12	2.68	5.52	5.4	8.6		2		
A2	1.44	1.14	1.8	61.6		0.5	2.21	4.44	10.17	16.6	19.4		0.47		
Bs	3.6	3.83	4.1	54.1		3.52	19.1	22.88	31.6	42.3	45.2		0.37		
Bc	2.92	3.32	4.4	84.3		0.68	7.74	8.04	17.95	28.1	50.2		0.32		

LOGNAN

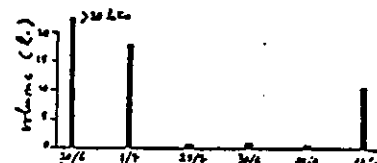
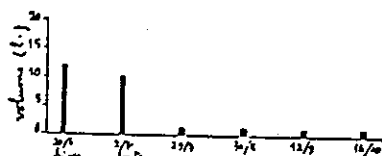
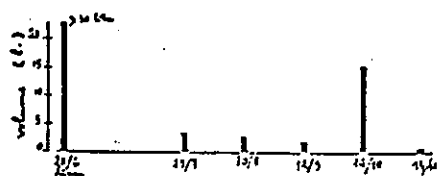
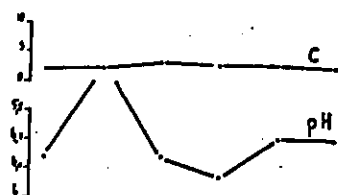
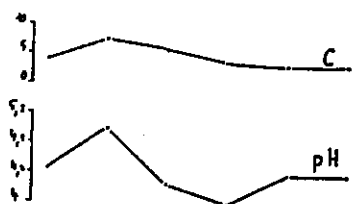
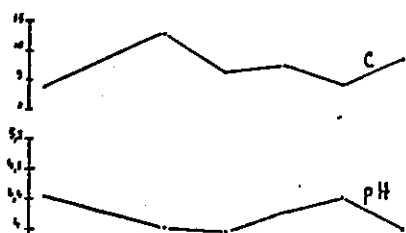
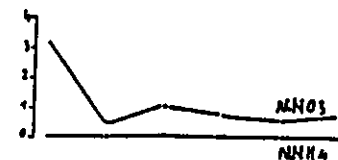
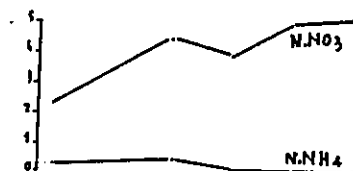
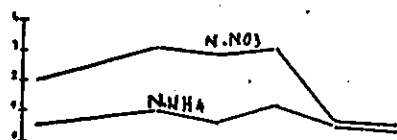
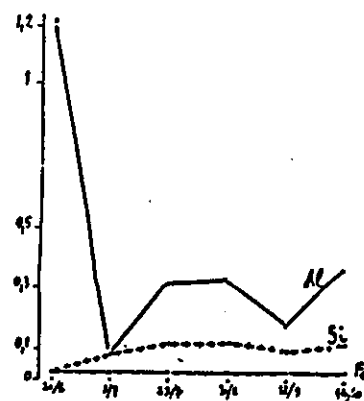
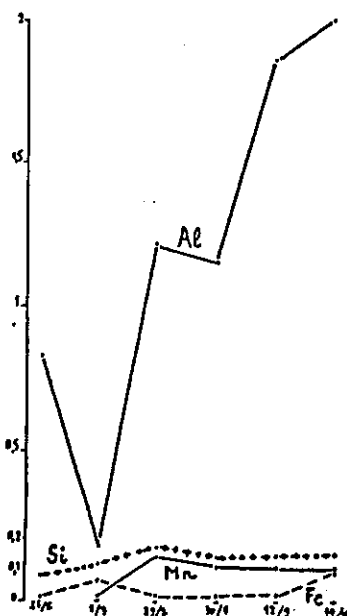
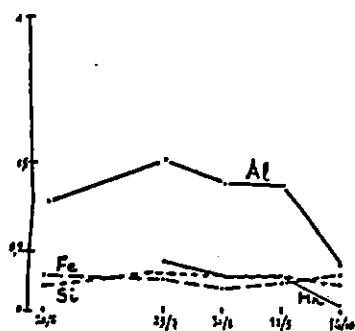
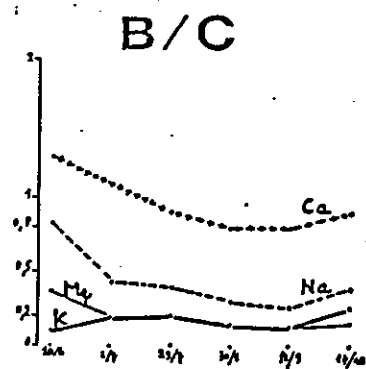
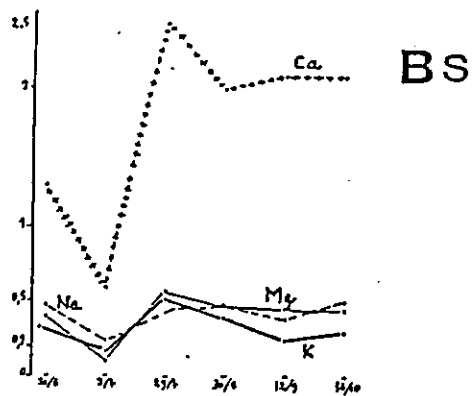
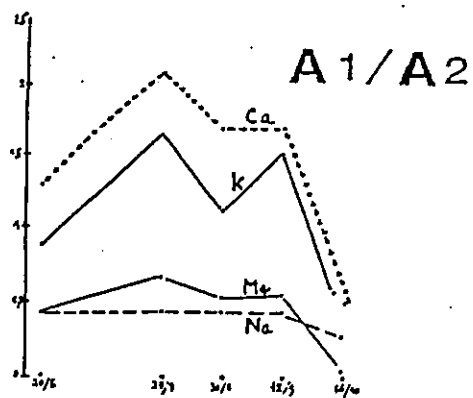
Horizon	H %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant meq/100 g					
		A	LF	LG	SF	SG		MO°/.. C °/..	N °/..	C/N		Ca	Hg	X	Na	S	T
Ao	102	232	359	162	128	118	3.8	619	360	13	27.7	5.6	1.61	1.13	0.08	8.4	60.3
A ₂	9	38	184	153	282	343	4.3	35.9	20.9	0.72	29	0.9	0.06	0.06	0.02	1	5.6
Bh	64	98	176	145	271	310	4.8	81.5	47.4	1.9	25	0.2	0.05	0.06	0.03	0.3	29.3
Bs	40	73	147	119	284	377	4.9	62.6	36.4	1.42	25.63	0.1	0.03	0.04	0.02	0.2	20.6
BC	4	32	177	136	264	391	5.6										
Horizon	OX	Al °/..			Tetra			Pyxo	OX	Fe °/..			Si CBD				
		CBD	Tam	Total							CBD	Dab	Total				
Ao	1.68	1.64	1.8	21.9			0.11	1.3	1.7		2.35	3.3	5.4			2.02	
A ₂	0.72	0.47	0.9	66.3			0	0	0		0.55	1	7.5			0.35	
Bh	7.24	7.5	9.7	63.7			5.82	16.9	23.5		22.7	29.6	37.7	0		0.17	
Bs	7.72	7.17	8.7	64.7			4.5	12.1	14.08		16.07	20.2	30.6			0.37	
BC			1.9	70								2.6	20				

LAVANCHER

Horizon	H %	Granulométrie %/..					pH eau	Matière Organique				Complexe absorbant mg/100 g							
		A	LF	LG	SF	SG		MO %/..	C %/..	N %/..	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T		
A ₀	58						4.7	256	149	7.33	20.34								
A ₂	51	148	253	163	133	303	4.6	140.3	81.6	4.43	18.41	7.1	1.37	0.55	0.031	9	20.6		
B _h	16	104	249	167	155	325	4.7	25.6	14.9	1.2	12.41	0.8	0.22	0.236	0.017	1.4	10		
B _s	59	70	249	188	168	325													
Horizon	OX	Al %/..					Fe %/..				SI CBD								
		CBD	Tam	Total	Arras		Tetra	Pyro	OX	CBD	Deb	Total							
A ₂	1.28	1.3					0.11	2.58	3.68	5.85			2.35						
B _h	1.64	1.64	2.4	61.9			0.48	3.05	4	5.8	8.9	22.6	0.3						
B _{s1}	1.88	2.5	2.9	76.4			1.36	3.52	5.32	8.12	10.8	26.8	0.45						
B _{s2}			4.1	78.3							10.2	28.1							

ANNEXE 3

Données lysimétriques



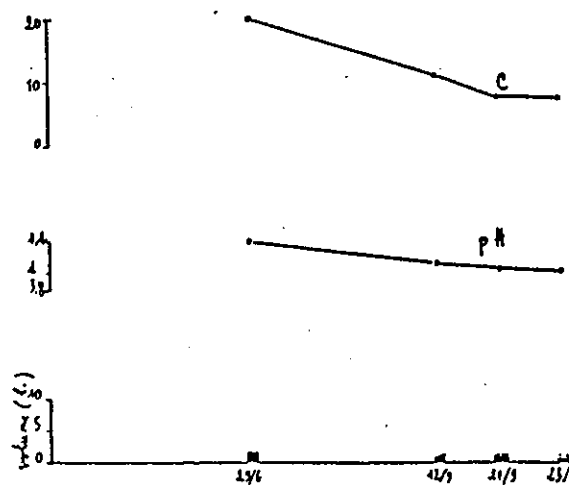
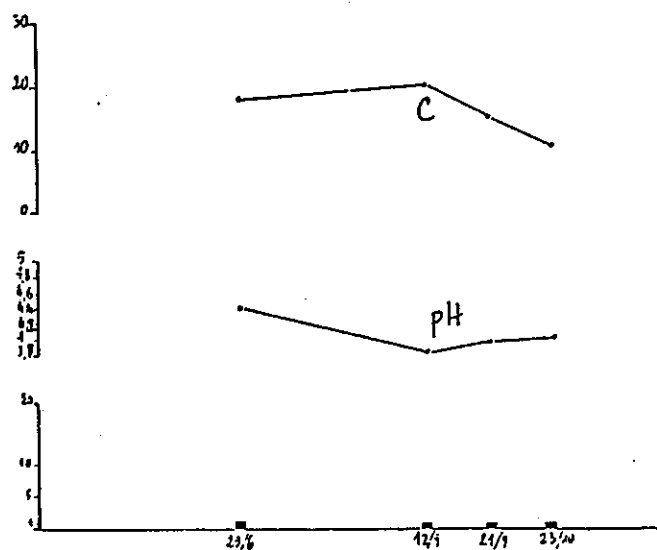
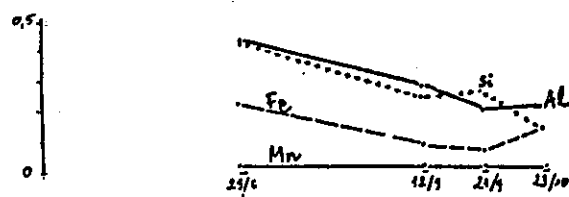
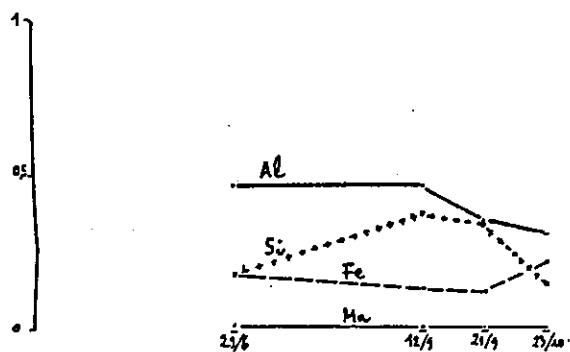
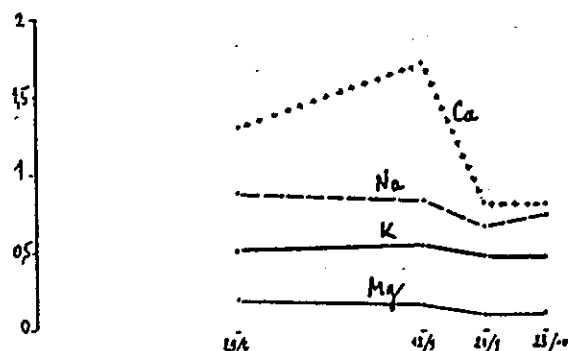
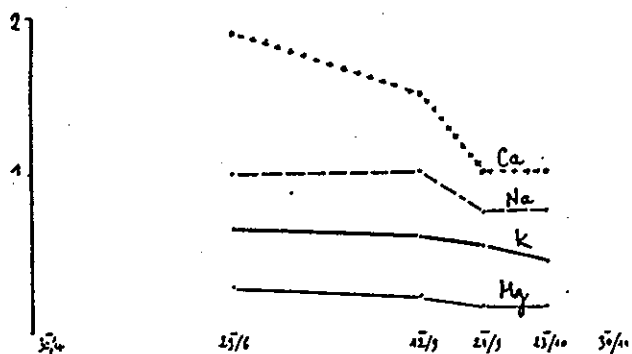
Balme, lysimètres A₁/A₂(2), Bs(2), BC(2)

Lognan, podzol situé sur la crête ventée
Lysimètres I A₂(1) et A₂(2)

LOGNAN

A2

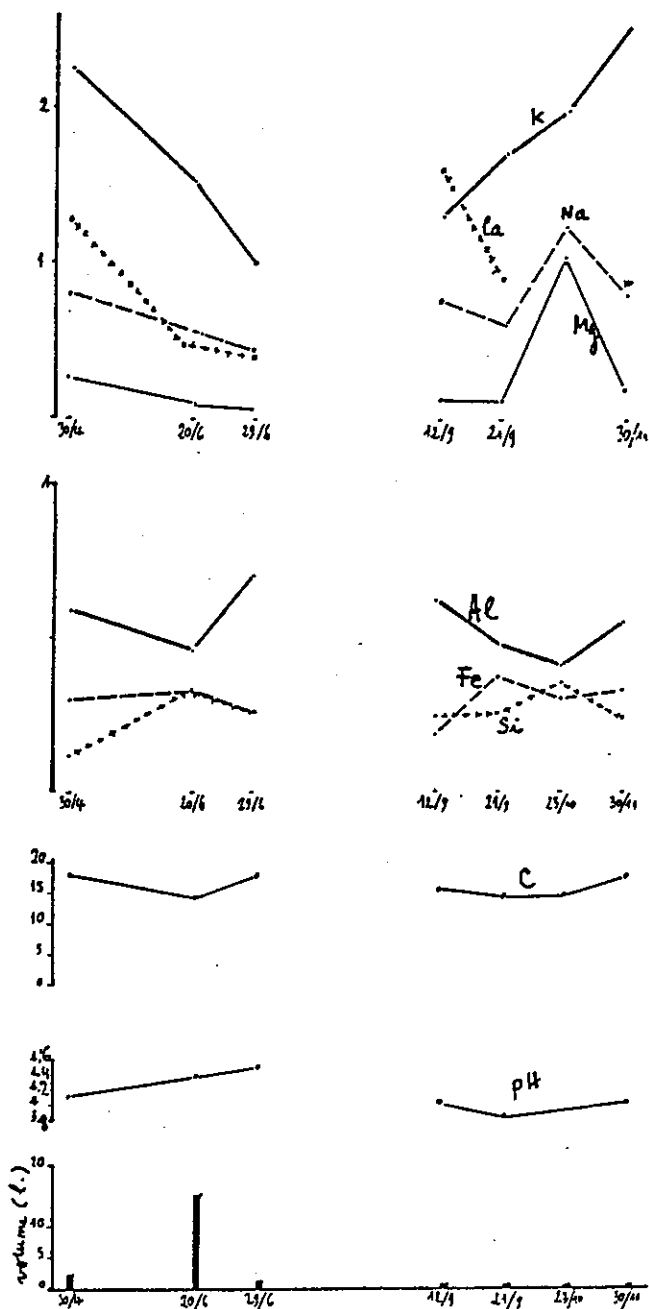
A2



Lognan, podzol situé sous la crête morainique
lysismètres II A₁ et II A₂

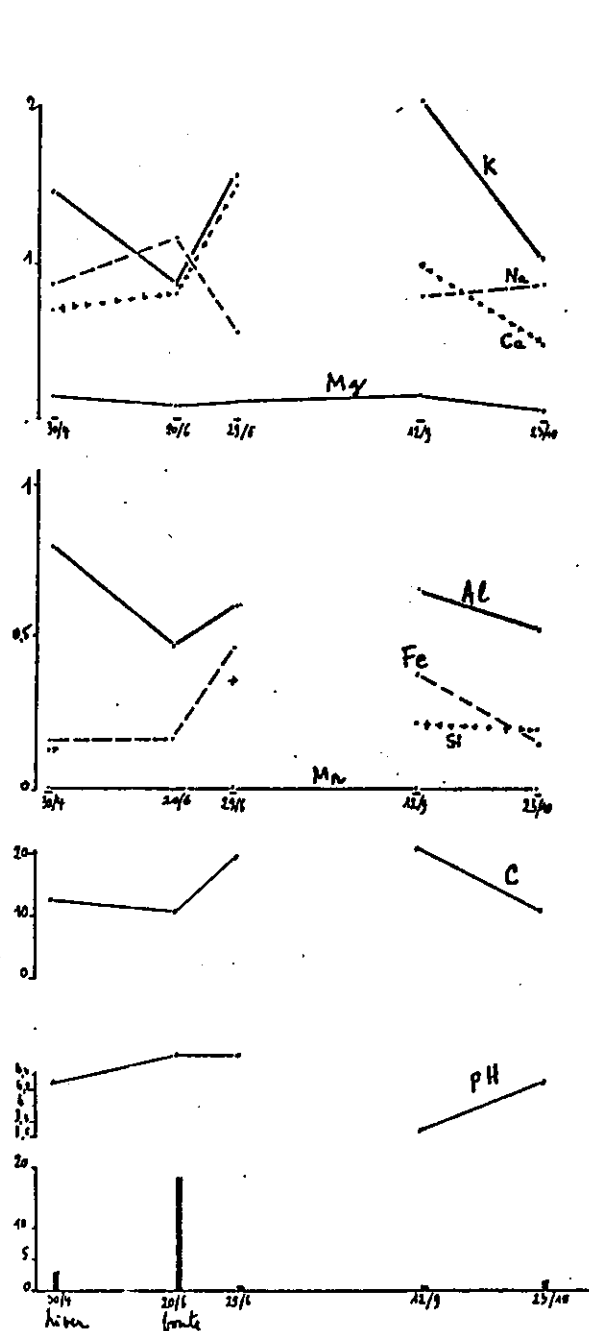
LOGNAN

A₁

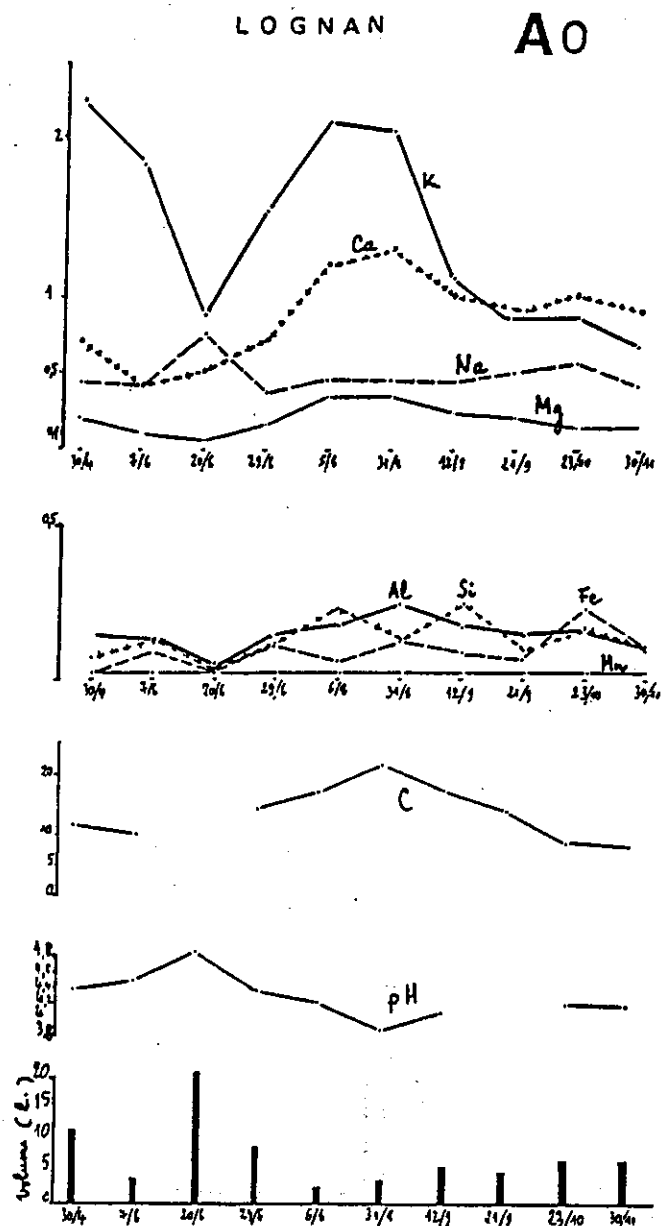


LOGNAN

A₂



Lognan, podzol situé sur la pente de la moraine
Lysimètre III Ao

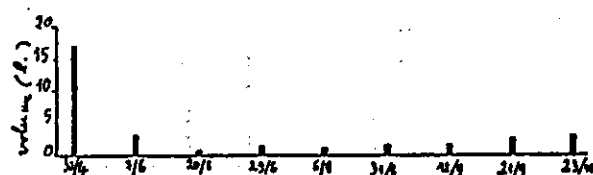
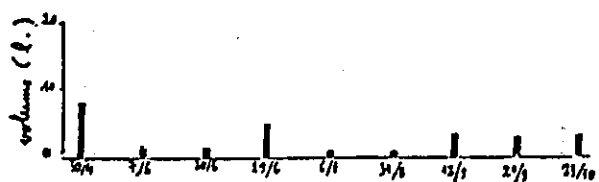
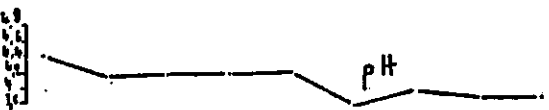
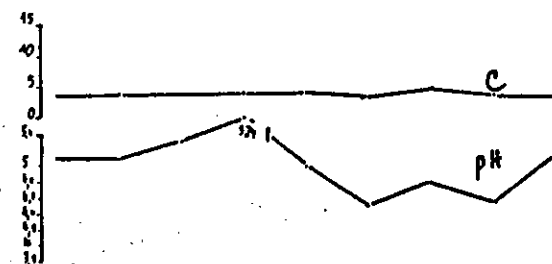
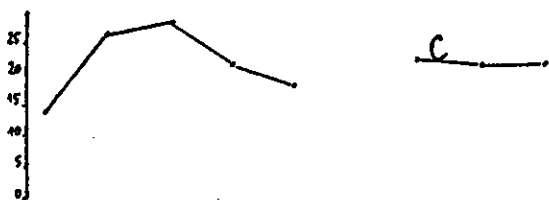
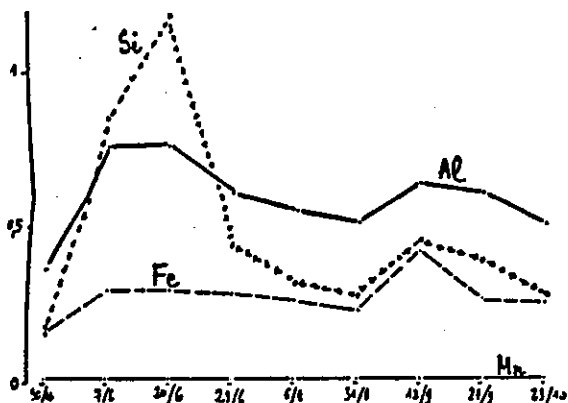
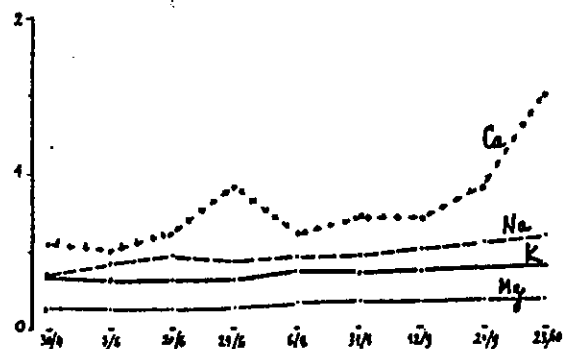
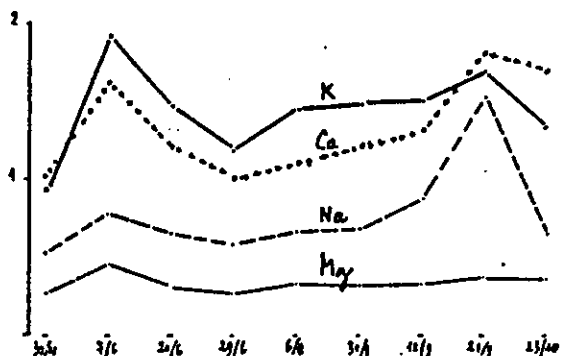


Lognan, podzol situé sur la pente morainique
Lysimètre IV A₁ et IV B_s

LOGNAN

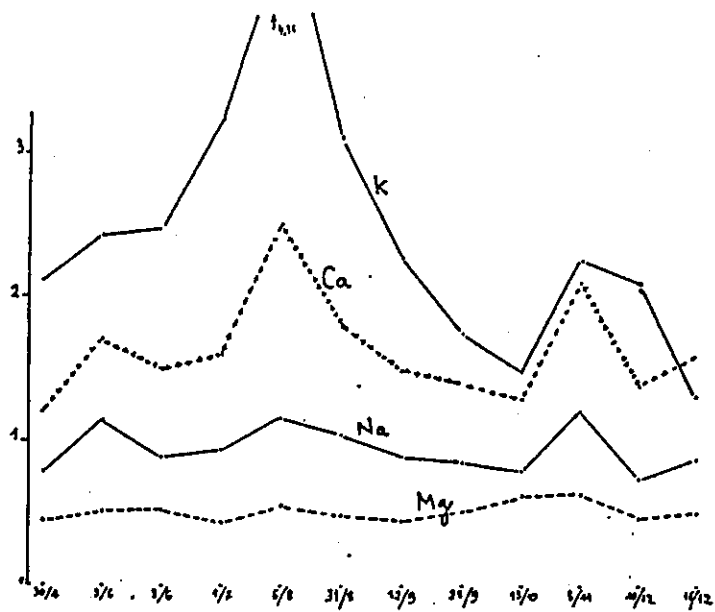
A1

BS

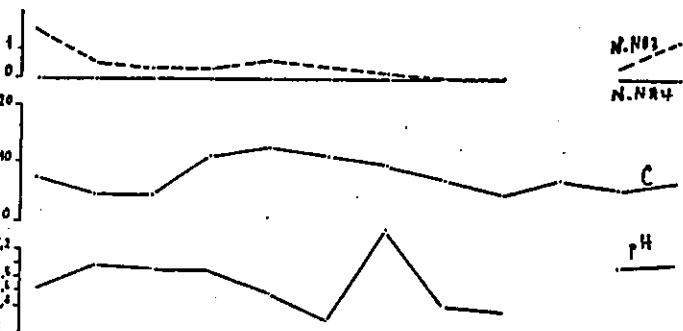
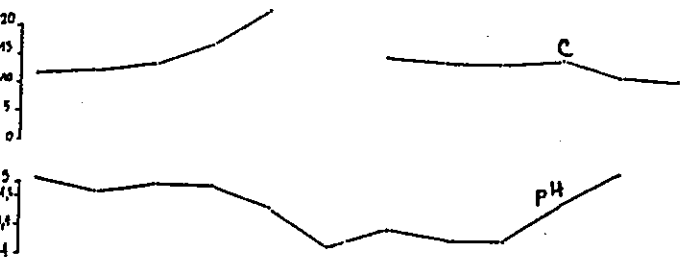
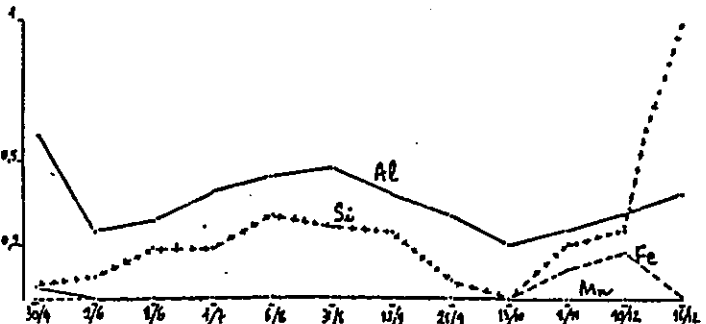
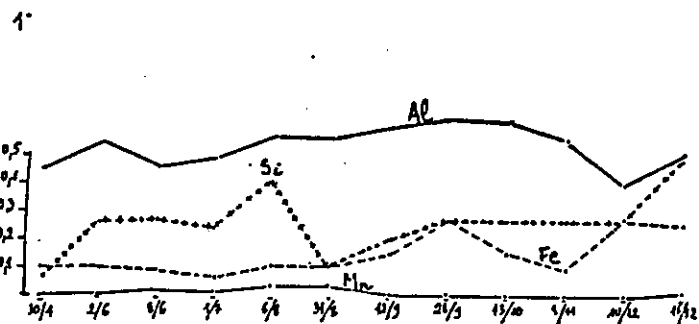
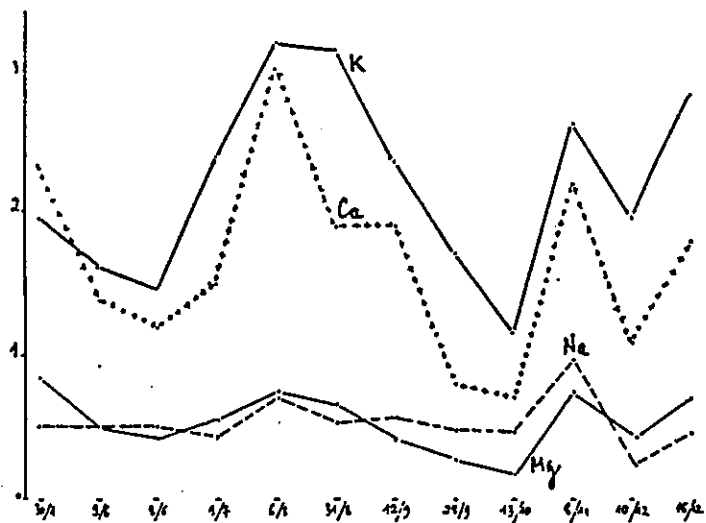


Lavancher, lysimètres A₁(1) et A₁(3)

A 1



A 1



Nivose A1

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	MNO3	MNH4	pH	C	vol
27	6	0.300	0.190	1.640	1.060	0.130	0.000	0.000	0.150	0.200	0.300	6.110	2.000	3.000
28	7	0.700	0.150	1.220	0.490	0.160	0.000	0.000	0.150	0.400	0.100	4.590	3.800	0.700
7	8	0.600	0.110	1.230	0.410	0.160	0.000	0.000	0.130	0.300	0.000	4.200	3.600	0.200
9	9	1.100	0.140	1.360	0.530	0.130	0.000	0.000	0.120	0.250	0.110	4.360	5.600	0.800
1	10	0.400	0.110	1.110	0.430	0.100	0.000	0.000	0.060	0.000	0.000	4.350	2.700	1.000

Nivose Bh

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	MNO3	MNH4	pH	C	vol
27	6	0.300	0.080	0.440	0.300	0.120	0.000	0.000	0.040	0.000	0.000	5.250	5.900	20.000
4	7	0.300	0.070	0.440	0.320	0.120	0.000	0.000	0.140	0.000	0.000	5.320	2.600	3.000
28	7	0.300	0.070	0.510	0.380	0.130	0.000	0.000	0.060	0.000	0.000	4.930	2.400	5.000
7	8	0.300	0.070	0.560	0.510	0.120	0.000	0.000	0.140	0.000	0.000	4.550	3.000	4.000
9	9	0.400	0.080	0.530	0.500	0.120	0.000	0.000	0.050	0.000	0.000	4.690	2.300	10.000
1	10	0.400	0.100	0.330	0.690	0.140	0.000	0.000	0.040	0.000	0.000	4.580	2.600	17.000
12	10	0.500	0.100	0.530	0.470	0.170	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000	5.220	9.000	18.000

Données lysimétriques

Bzime A2_1

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	MNO3	PNH4	pH	C	vol
20	6	1.500	0.440	1.120	0.700	0.450	0.090	0.090	0.060	2.000	0.670	4.500	4.200	30.000
2	7	0.500	0.110	0.480	0.280	0.140	0.080	0.020	0.150			5.000	4.900	7.000
29	7	1.600	0.490	2.690	0.560	0.410	0.110	0.100	0.120	3.300	1.320	4.110	9.380	1.500
30	8	1.100	0.320	1.830	0.400	0.320	0.100	0.068	0.100	2.300	1.100	4.000	6.300	1.500
13	9	1.400	0.340	0.480	0.420	0.890	0.330	0.080	0.090	2.500	0.100	4.300	3.400	1.500
14	10	0.800	0.210	0.930	0.300	0.250	0.120	0.030	0.060	1.200	0.500	4.120	5.200	2.500
14	11	1.400	0.320	1.130	0.470	0.330	0.070	0.070	0.160	0.900	0.300	3.990	13.000	0.500

Bzime A2.2

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	MNO3	PNH4	pH	C	vol
20	6	1.300	0.420	0.890	0.430	0.370	0.120	0.070	0.080	2.000	0.500	4.440	3.800	30.000
29	7	2.100	0.740	1.650	0.450	0.510	0.110	0.170	0.130	3.100	1.020	4.000	12.200	3.000
30	8	1.700	0.540	1.120	0.440	0.440	0.080	0.120	0.120	2.900	0.830	3.930	6.390	2.500
13	9	1.700	0.560	1.530	0.440	0.430	0.100	0.120	0.120	3.100	1.230	4.230	7.600	1.500
14	10	0.500	0.140	0.580	0.290	0.160	0.130	0.020	0.100	0.700	0.590	4.420	4.100	15.000

Bzime Bz.1

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	MNO3	PNH4	pH	C	vol
20	6	1.500	0.410	0.320	0.370	0.840	0.000	0.050	0.080	2.500	0.000	4.590	2.400	8.000
2	7	0.600	0.140	0.240	0.280	0.240	0.070	0.010	0.120	0.500	0.000	4.840	9.100	5.000
29	7	2.100	0.500	0.650	0.510	1.290	0.000	0.090	0.140	4.000	0.100	4.260	2.600	0.500
30	8	2.000	0.490	0.500	0.400	1.410	0.090	0.090	0.080	4.200	0.000	4.030	2.100	0.500
12	9	0.900	0.290	1.120	0.350	0.330	0.000	0.050	0.090	2.000	0.070	4.200	5.500	0.800
14	10	1.000	0.220	0.450	0.440	0.480	0.000	0.040	0.050	1.200	0.150	4.300	2.800	0.500
14	11	1.000	0.290	0.750	0.360	0.620	0.070	0.070	0.170	1.300	0.150	4.410	11.000	0.200

Données lysimétriques

Balme Bs 2

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	NO3	NH	pH	C	vol
20	5	1 300	0 400	0 360	0 480	0 830	0 000	0 090	0 090	2 300	0 320	4 480	4 000	12 000
2	7	0 600	0 110	0 160	0 240	0 190	0 070	0 030	0 130	0 000	0 000	4 050	7 300	10 000
29	7	2 500	0 570	0 530	0 450	1 210	0 000	0 150	0 130	4 500	0 500	4 230	5 400	1 000
30	8	2 000	0 470	0 390	0 480	1 150	0 000	0 110	0 140	3 900	0 100	3 940	3 500	1 000
12	9	2 100	0 450	0 250	0 390	1 860	0 050	0 110	0 150	5 000	0 100	4 340	2 900	0 800
14	10	2 100	0 450	0 310	0 500	2 090	0 110	0 090	0 150	5 100	0 100	4 330	2 700	0 700

Balme BC.1

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	NO3	NH	pH	C	vol
20	5	0 700	0 190	0 100	0 560	0 620	0 030	0 000	0 040	1 600	0 000	4 530	2 200	20 000
2	7	0 600	0 100	0 190	0 710	0 110	0 000	*	*	0 200	0 000	4 950	1 700	11 000
29	7	0 600	0 120	0 200	0 420	0 290	0 070	0 030	0 100	0 600	0 100	*	3 500	0 150
30	8	0 800	0 120	0 140	0 370	0 320	0 000	0 020	0 090	0 500	0 240	4 180	3 100	0 500
12	9	0 600	0 110	0 130	0 410	0 200	0 000	0 020	0 100	0 500	0 000	4 290	3 100	0 800
14	10	0 600	0 070	0 160	0 520	0 190	0 000	0 000	0 110	0 300	0 030	4 800	2 900	1 000

Balme BC.2

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	NO3	NH	pH	C	vol
20	6	1 300	0 370	0 110	0 830	1 220	0 000	0 030	0 060	3 200	0 000	4 570	2 000	20 000
2	7	1 100	0 210	0 190	0 430	0 070	0 000	0 000	0 090	0 500	0 000	6 000	2 300	13 000
29	7	0 900	0 210	0 230	0 400	0 310	0 000	0 040	0 120	1 100	0 100	4 580	3 300	0 700
30	9	0 800	0 170	0 140	0 310	0 330	0 000	0 020	0 120	0 800	0 000	4 300	2 700	1 000
12	9	0 800	0 140	0 130	0 270	0 180	0 000	0 020	0 090	0 600	0 000	4 810	2 700	0 800
14	10	0 900	0 170	0 260	0 390	0 360	0 080	0 020	0 110	0 900	0 000	4 900	2 400	11 000

Lognan I_A31

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol
29	6	1.900	0.280	0.650	0.990	0.470	0.180	0.000	0.190	0.000	0.000	4.400	18.100	1.000
12	9	1.500	0.220	0.590	1.010	0.470	0.130	0.000	0.370	0.000	0.000	3.800	20.300	0.500
21	9	1.000	0.160	0.540	0.750	0.360	0.120	0.000	0.340	0.000	0.000	3.940	14.900	0.300
23	10	1.000	0.160	0.440	0.760	0.310	0.210	0.000	0.150	0.000	0.000	4.000	10.400	0.400

Lognan I_A32

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol
29	6	1.300	0.200	0.510	0.890	0.430	0.210	0.000	0.420	0.000	0.000	4.390	22.000	1.000
13	9	1.700	0.170	0.540	0.820	0.270	0.080	0.000	0.240	0.000	0.000	4.120	11.300	1.000
21	9	0.800	0.100	0.470	0.660	0.190	0.060	0.000	0.250	0.000	0.000	4.050	7.800	0.500
23	10	0.800	0.110	0.470	0.730	0.200	0.130	0.000	0.130	0.000	0.000	4.030	7.200	0.600

Lognan I_A1

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol
30	4	1.300	0.270	2.270	0.320	0.590	0.300	0.000	0.120	0.000	0.000	4.120	17.900	2.000
30	6	0.500	0.100	1.540	0.540	0.460	0.320	0.000	0.360	0.000	0.000	4.350	11.000	15.000
29	6	0.400	0.070	1.010	0.430	0.700	0.250	0.000	0.260	0.000	0.000	4.500	17.500	1.000
12	9	1.600	0.140	1.310	0.770	0.620	0.180	0.000	0.240	0.000	0.000	3.980	15.100	0.400
21	9	0.900	0.120	1.700	0.610	0.480	0.370	0.000	0.250	0.000	0.000	3.780	13.900	0.150
23	10	5.300	1.060	1.990	1.250	0.410	0.300	0.000	0.350	0.000	0.000	*	14.200	0.100
30	11	0.900	0.210	2.540	0.800	0.550	0.330	0.000	0.240	0.000	0.000	3.950	16.800	0.300

Lognum II_A2

jour														
mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol	
30	4	0.700	0.150	1.450	0.370	0.800	0.160	0.000	0.160	0.000	0.000	4.200	12.500	3.000
20	6	0.800	0.090	0.870	1.160	0.430	0.170	*	0.000	0.000	4.620	10.500	13.000	
29	6	1.500	0.140	1.550	0.560	0.610	0.470	0.000	0.360	0.000	0.000	4.620	19.400	0.400
12	9	1.100	0.180	2.050	1.210	0.670	0.390	0.000	0.230	0.000	0.000	3.650	20.800	0.200
23	10	0.500	0.080	1.050	0.890	0.540	0.170	0.000	0.210	0.000	0.000	4.260	10.500	1.000

Lognum II_Bh

jour														
mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol	
30	4	0.900	0.210	1.140	0.510	0.450	0.050	0.000	0.140	0.000	0.000	4.640	8.400	7.000
20	6	0.400	0.120	0.790	0.340	0.350	0.160	0.000	0.160	0.000	0.000	4.770	5.300	17.000
29	6	0.600	0.160	1.070	0.370	0.530	0.180	0.000	0.110	0.000	0.000	4.650	9.700	2.000
12	9	2.500	0.220	1.160	0.710	0.410	0.030	0.000	0.170	0.000	0.000	4.740	9.100	2.000
21	9	0.060	0.140	0.980	0.440	0.460	0.110	0.000	0.200	0.000	0.000	*	7.700	1.500
23	10	1.300	0.170	0.970	0.630	0.440	0.170	0.000	0.160	0.000	0.000	4.440	8.300	2.000
30	11	0.700	0.150	0.900	0.510	0.340	0.900	0.000	0.120	0.000	0.000	4.150	7.100	1.000

Lognum III_A01

mois														
Jour	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol	
30	1	0.700	0.180	1.120	0.330	0.170	0.030	0.000	0.030	0.000	0.000	4.410	11.300	15.000
7	6	0.500	0.100	0.730	0.310	0.150	0.090	0.000	0.100	0.000	0.000	4.530	8.300	20.000
20	6	0.300	0.040	0.600	0.200	0.080	0.050	0.000	0.050	0.000	0.000	4.930	4.100	2.000
29	6	0.080	0.170	1.230	0.350	0.160	0.080	0.000	0.170	0.000	0.000	4.400	14.500	1.500
6	8	1.600	0.400	2.100	0.520	0.230	0.100	0.000	0.260	0.000	0.000	4.220	20.000	0.500
31	8	1.700	0.390	1.890	0.410	0.210	0.120	0.000	0.140	0.000	0.000	3.780	21.300	0.250
12	9	1.800	0.430	2.020	0.580	0.310	0.450	0.000	0.180	0.000	0.000	3.830	24.700	0.500
21	9	1.300	0.300	0.970	0.360	0.170	0.070	0.000	0.150	0.000	0.000	4.120	19.400	0.500
23	10	0.700	0.310	0.970	0.590	0.130	0.210	0.000	0.230	0.000	0.000	*	10.200	0.200
30	11	0.300	0.070	0.530	0.280	0.050	0.490	0.000	0.130	0.000	0.000	4.340	3.000	4.500

Lognan III_A02

		mois													
jour		Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol	
30	4	0.700	0.200	2.250	0.430	0.140	0.000	0.000	0.060	0.000	0.000	4.380	11.800	12.000	
7	6	0.400	0.100	1.650	0.400	0.120	0.080	0.000	0.130	0.000	0.000	4.460	10.300	4.000	
20	6	0.500	0.050	0.670	0.740	0.070	0.000	*	*	0.000	0.000	4.850	3.900	20.000	
29	6	0.700	0.160	1.540	0.360	0.140	0.100	0.000	0.120	0.000	0.000	4.350	14.600	9.000	
6	8	1.200	0.390	2.110	0.450	0.170	0.000	0.000	0.220	0.000	0.000	4.190	17.300	2.500	
31	8	1.300	0.350	2.060	0.430	0.240	0.110	0.000	0.120	0.000	0.000	3.840	21.700	3.500	
12	9	1.000	0.240	1.100	0.440	0.170	0.080	0.000	0.240	0.000	0.000	4.080	17.500	6.000	
21	9	0.900	0.210	0.670	0.500	0.140	0.060	0.000	0.090	0.000	0.000	*	14.400	5.000	
23	10	1.000	0.140	0.870	0.560	0.150	0.220	0.000	0.170	0.000	0.000	4.200	9.100	7.000	
30	11	0.900	0.150	0.670	0.410	0.090	0.120	0.000	0.110	0.000	0.000	4.180	8.300	7.000	

Lognan III_E

jour	mois	analyse chimique												pH	C	vol
		Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4					
30	4	0.400	0.110	0.160	0.690	0.270	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	4.740	3.400	5.000		
7	6	0.300	0.090	0.120	0.570	0.220	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	4.720	2.700	18.000		
20	6	0.400	0.080	0.180	0.590	0.280	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	4.770	3.600	13.000		
29	6	0.400	0.080	0.150	0.550	0.240	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	4.880	3.500	2.500		
12	9	0.600	0.090	0.290	0.700	0.220	0.000	0.000	0.080	0.000	0.000	4.340	3.800	1.000		
21	9	0.400	0.090	0.170	0.630	0.220	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	4.460	2.400	1.000		
23	10	0.600	0.120	0.190	0.860	0.200	0.060	0.000	0.060	0.000	0.000	4.720	3.800	3.000		
30	11	0.400	0.100	0.150	0.730	0.230	0.000	0.000	0.080	0.000	0.000	4.380	3.600	3.000		

Lognan IV_A11

jour	mois															C	vol
	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH						
29	4	0.700	0.210	1.220	0.550	0.400	0.180	0.000	0.160	0.000	4.450	13.800	5.500				
7	6	0.900	0.280	1.140	0.650	0.740	0.250	0.000	1.010	0.000	4.300	23.300	4.000				
20	6	1.000	0.280	0.980	0.650	0.790	0.290	0.000	0.780	0.000	4.330	23.900	3.000				
29	6	1.000	0.280	1.040	0.590	0.780	0.310	0.000	0.580	0.000	4.330	22.500	2.000				
6	8	1.600	0.410	1.870	0.830	0.550	0.170	0.000	0.250	0.000	4.320	19.400	0.200				
31	8	1.400	0.350	1.820	0.750	0.540	0.210	0.000	0.330	0.000	3.890	16.600	0.500				
12	9	1.000	0.290	1.560	0.740	0.670	0.250	0.000	0.500	0.000	3.970	14.900	1.000				
21	9	1.700	1.020	2.490	0.950	0.840	0.130	0.070	0.180	0.000	3.970	14.900	1.000				
23	10	0.800	0.220	0.960	0.660	0.590	0.200	0.000	0.270	0.000	4.110	15.000	2.000				
30	11	0.800	0.230	0.850	0.610	0.520	0.260	0.000	0.240	0.000	4.070	14.900	1.000				

Données lysimétriques

Lognan IV_A12

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	NH4	pH	C	vol
29	4	1.000	0.260	0.940	0.510	0.370	0.170	0.000	0.170	0.000	0.000	4.390	13.700	8.000
7	6	1.600	0.460	1.900	0.770	0.770	0.300	0.000	0.360	0.000	0.000	4.140	26.500	1.000
20	6	1.200	0.310	1.470	0.640	0.780	0.300	0.000	1.180	0.000	0.000	4.230	28.500	1.000
29	6	1.000	0.270	1.190	0.580	0.620	0.290	0.000	0.450	0.000	0.000	4.230	22.200	4.500
6	8	1.100	0.330	1.440	0.650	0.560	0.270	0.000	0.330	0.000	0.000	4.230	18.700	0.500
31	8	1.200	0.320	1.430	0.660	0.520	0.240	0.000	0.290	0.000	0.000	3.820		0.500
12	9	1.300	0.330	1.510	0.870	0.650	0.430	0.000	0.460	0.000	0.000	4.030	23.000	3.500
21	9	1.800	0.360	1.710	1.510	0.620	0.270	0.000	0.400	0.000	0.000	3.930	22.300	3.000
23	10	1.700	0.340	1.350	0.640	0.520	0.260	0.000	0.290	0.000	0.000	3.950	22.500	3.500

Lognan IV_Bs

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	NH4	pH	C	vol
30	4	0.700	0.180	0.300	0.640	0.170	0.000	*	*	0.000	0.000	5.100	3.400	17.000
7	6	0.500	0.120	0.310	0.430	0.120	0.070	0.000	0.110	0.000	0.000	5.080	3.700	3.000
20	6	0.060	0.120	0.310	0.470	0.190	0.000	0.000	0.120	0.000	0.000	5.320	3.900	0.700
29	6	0.900	0.140	0.310	0.420	0.140	0.080	0.000	0.110	0.000	0.000	5.740	4.000	1.000
6	8	0.600	0.170	0.360	0.450	0.150	0.050	0.000	0.120	0.000	0.000	5.030	4.500	1.000
30	8	0.700	0.170	0.350	0.470	0.170	0.000	0.000	0.070	0.000	0.000	4.550	3.500	1.500
12	9	0.700	0.170	0.350	0.500	0.170	0.000	0.000	0.140	0.000	0.000	4.790	4.900	1.500
21	9	0.900	0.190	0.370	0.530	0.140	0.000	0.000	0.070	0.000	0.000	4.550	3.700	2.500
23	10	1.500	0.180	0.380	0.590	0.110	0.070	0.000	0.130	0.000	0.000	5.120	3.400	3.000

Données lysimétriques

Lavanch I_A11

mois		Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	M-NO3	M-NH4	pH	C	vol
jour														
28	4	1.200	0.790	2.110	0.440	0.450	0.090	0.000	0.080	0.150	0.150	5.050	12.000	15.000
2	6	1.700	1.140	2.420	0.510	0.350	0.100	0.020	0.260	0.400	0.000	4.880	12.300	6.000
8	6	1.500	0.890	2.470	0.520	0.460	0.090	0.030	0.270	0.100	0.000	4.970	13.500	2.000
1	7	1.600	0.940	3.240	0.410	0.490	0.070	0.020	0.240	0.000	0.000	4.930	13.800	4.000
6	8	2.500	1.170	4.380	0.560	0.570	0.110	0.040	0.410	0.000	0.000	4.680	22.900	1.500
31	8	1.800	1.050	3.120	0.490	0.570	0.110	0.040	0.110	0.000	0.100	4.130	*	1.500
12	9	1.500	0.900	2.270	0.450	0.610	0.150	0.020	0.200	0.000	0.000	4.350	14.900	3.000
28	9	1.400	0.860	1.760	0.510	0.540	0.270	0.020	0.260	0.000	0.000	4.200	14.000	3.500
13	10	1.300	0.800	1.490	0.620	0.630	0.160	0.020	0.270	0.000	0.000	4.200	13.900	1.500
8	11	2.100	1.220	2.260	0.630	0.560	0.100	0.020	0.270	0.000	0.000	4.740	14.700	0.400
10	12	1.400	0.750	2.100	0.490	0.400	0.280	0.020	0.270	0.000	0.190	5.150	11.900	5.000
16	12	1.600	0.880	1.330	0.510	0.500	0.260	0.030	0.490	0.150	0.000	*	11.200	0.100

Lavanch I_A12

mois		Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	M-NO3	M-NH4	pH	C	vol
jour														
28	4	1.500	0.540	1.650	0.400	0.270	0.000	0.000	0.010	0.500	0.000	5.060	6.290	12.500
2	6	2.400	0.830	2.510	0.530	0.420	0.000	0.070	0.140	1.200	0.020	4.780	10.600	3.000
8	6	1.900	0.700	2.000	0.510	0.480	0.110	0.040	0.150	1.100	0.160	4.710	8.300	0.800
1	7	3.400	0.970	3.230	0.560	0.320	0.100	0.060	0.160	2.600	0.290	5.360	11.300	1.000
6	8	3.100	0.850	4.400	0.720	0.380	0.120	0.110	0.180	1.000	0.550	5.310	20.500	2.000
30	8	5.300	1.440	4.610	1.770	0.670	0.110	0.140	0.140	3.000	0.250	3.990	15.500	0.800
12	9	3.100	0.870	2.640	0.510	0.430	0.140	0.090	0.140	1.800	0.100	4.440	11.500	1.000
28	9	2.000	0.560	1.490	0.680	0.490	0.140	0.050	0.300	0.400	0.000	4.520	11.300	2.500
13	10	1.600	0.460	1.320	0.590	0.500	0.150	0.040	0.190	0.400	0.150	4.090	9.700	1.200
10	12	2.400	0.770	1.880	0.640	0.490	0.120	0.040	0.310	1.400	0.110	4.540	9.690	1.500
16	12	3.300	1.010	2.040	0.660	0.540	0.060	0.080	0.920	3.200	0.000	4.640	7.300	0.100

Lavanch I_A13

mois		Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	M-NO3	M-NH4	pH	C	vol
jour														
28	4	2.300	0.840	1.950	0.510	0.600	0.000	0.050	0.060	1.600	0.000	4.680	7.500	10.500
2	6	1.400	0.510	1.620	0.490	0.250	0.000	0.000	0.080	0.500	0.000	4.970	4.900	2.000
8	6	1.200	0.420	1.460	0.500	0.290	0.000	0.000	0.190	0.300	0.000	4.920	4.700	1.500
1	7	1.500	0.550	2.380	0.420	0.390	0.000	0.000	0.190	0.300	0.000	4.930	11.400	6.000
6	8	3.000	0.740	3.180	0.700	0.450	0.000	0.030	0.310	0.600	0.000	4.620	13.300	4.000
31	8	1.900	0.650	3.130	0.520	0.480	0.000	0.030	0.270	0.350	0.000	4.240	11.700	4.500
12	9	1.900	0.410	2.350	0.560	0.390	0.000	0.020	0.250	0.200	0.000	5.540	10.000	6.000
28	9	0.800	0.280	1.720	0.480	0.310	0.000	0.000	0.080	0.000	0.000	4.440	7.500	9.000
13	10	0.700	0.180	1.170	0.470	0.210	0.000	0.000	0.030	0.000	0.100	4.340	5.000	2.500
8	11	2.200	0.740	2.620	0.970	0.260	0.120	0.020	0.200	0.000	0.000	*	7.700	0.100
10	12	1.100	0.420	1.980	0.340	0.320	0.180	0.000	0.260	0.300	0.000	4.970	5.900	5.000
16	12	1.800	0.690	2.820	0.450	0.390	0.000	0.020	1.000	1.200	0.000	5.040	7.200	0.800

Données lysimétriques

Lavanch I_A1B

Lavanch I_B1

Lavanch I_B2

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol
2	6	6.300	2.470	10.440	1.100	1.530	0.220	0.040	0.470	0.000	0.000	4.590	32.300	1.500
3	6	4.900	1.910	8.440	0.970	1.600	0.270	0.030	0.730	0.000	0.000	4.650	33.300	0.350
1	7	4.600	1.700	8.640	1.000	1.350	0.240	0.040	0.530	0.000	0.000	4.800	41.300	2.000
6	8	9.000	3.370	13.930	1.220	1.860	0.240	0.090	1.490	0.300	0.150	4.330	69.400	0.500
31	8	5.100	1.830	9.200	0.960	1.370	0.230	0.040	0.430	0.150	0.000	4.100	36.000	0.500
12	9	7.200	1.720	8.490	1.030	1.420	0.270	0.040	0.450	0.250	0.000	4.750	40.600	1.500
28	9	4.300	1.610	7.270	0.790	1.670	0.330	0.040	0.750	0.000	0.000	4.260	41.600	4.500
13	10	4.500	1.690	6.670	1.550	1.710	0.360	0.040	0.700	0.000	0.170	4.050	33.100	1.000
10	12	5.300	2.050	7.250	0.790	1.320	0.210	0.030	0.380	0.000	0.300	4.750	34.400	3.000

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol
28	4	1.300	0.760	1.750	0.700	0.540	0.050	0.050	0.070	0.000	0.000	4.750	10.500	9.000
2	6	1.800	1.180	2.110	0.710	0.730	0.030	0.090	0.230	0.200	0.000	4.610	10.500	0.400
3	6	2.300	1.740	2.330	1.010	0.890	0.090	0.090	0.260	0.000	0.000	4.440	11.700	0.300
12	9	3.100	1.980	4.180	1.200	1.220	0.060	0.180	0.710	0.250	0.450	4.520	28.600	0.500
28	9	1.600	1.050	2.440	0.670	0.860	0.060	0.070	0.110	0.000	0.100	4.220	15.900	2.500
13	10	1.600	1.050	2.200	0.730	0.800	0.110	0.030	0.160	0.000	0.000	4.040	11.500	0.500
10	12	2.100	1.280	2.520	0.890	0.860	0.180	0.090	0.450	0.000	0.000	4.480	14.500	1.000

jour	mois	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Si	N-NO3	N-NH4	pH	C	vol
28	4	0.900	0.690	0.620	0.480	0.340	0.000	0.000	0.120	0.000	0.000	4.930	7.200	29.000
2	6	1.000	0.680	0.610	0.530	0.430	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	4.930	8.600	7.000
8	6	1.300	0.880	0.720	0.590	0.380	0.000	0.000	0.180	0.000	0.000	4.840	6.700	2.000
12	9	1.600	1.090	0.940	0.700	0.450	0.000	0.020	0.250	0.000	0.000	4.780	15.400	0.400
28	9	1.600	1.020	0.860	0.930	0.360	0.000	0.010	0.130	0.000	0.000	4.310	11.700	3.500
13	10	1.500	0.840	0.710	0.980	0.330	0.000	0.000	0.080	0.000	0.000	4.000	6.900	0.500
10	12	0.900	0.600	0.490	0.540	0.240	0.000	0.000	0.340	0.000	0.000	5.050	7.300	13.000

Données lysimétriques

ANNEXE 4

Evolution de la CEC et de la saturation des vermiculites test

E	Echantillons	Ba	Ca	Mg	K	Mn	Na	Fe	Al	H	acidité	S	CEC
1	Balme (P) A2	76.48	16.09	25.91	0.29	0	0	0	1.80	0.72	2.52	118.77	121.29
2	" (P) Bs	85.95	3.06	23.55	0.11	0	0	0	1.43	0.72	2.15	112.67	114.82
3	Lognan (P) Ao	78.98	8.38	26.15	0.13	0.11	0	0	0.71	1.80	2.51	113.75	116.26
4	" (P) A2	82.05	4.16	22.20	0.93	0	0	0	0.60	1.80	2.40	109.34	111.74
5	" (P) Bs	52.34	12.53	14.00	0.16	0	0	0	1.45	2.29	3.74	79.03	82.77
6	Lavancher (P) Ao	86.46	2.92	21.23	0.36	0	0	0	0.97	1.81	2.78	110.97	113.75
7	" (P) A1	75.24	13.65	27.62	0.34	0.81	0	0	1.10	1.68	2.88	117.66	120.54
8	Nivose (P) A1	84.19	3.45	23.76	0.27	0	0	0	1.81	1.80	2.41	111.67	114.08
9	" (P) Bh	73.61	6.15	18.85	0.14	0	0	0	0.71	2.04	2.75	98.75	101.50
10	Balme (A) A2	78.73	5.32	24.03	0.41	0.07	0	0	1.44	2.05	3.49	108.56	112.05
11	Lognan (A) Ao	51.11	18.33	25.15	0.63	0.11	0	0	1.19	2.74	3.93	95.33	99.26
12	" (A) A2	58.17	13.88	21.48	0.61	0.02	0	0	0.84	2.74	3.58	94.16	97.74
13	" (A) Bs	13.10	17.55	9.63	0.18	0	0	0	1.44	3.48	4.92	40.46	45.38
14	Lavancher (A) Ao	83.98	9.13	29.41	0.28	0.11	0	0	1.31	1.32	1.44	122.91	124.35
15	" (A) A1	82.09	12.16	27.51	0.47	0.08	0	0	0.78	1.67	2.45	122.31	124.76
16	" (A) B	72.93	17.19	26.75	0.41	0.33	0.26	0	0.59	1.80	2.39	117.87	120.26
17	" (A) (B)	68.02	21.22	29.35	0.40	0.12	0	0	1.18	0.72	1.90	119.11	121.01
18	Nivose (1) A1	70.97	10.10	26.17	0.36	0.18	0	0	0.85	2.04	2.89	107.78	110.67
19	" (A) Bh	65.53	7.35	17.77	0.21	0	0.52	0	1.07	2.16	3.23	91.38	94.61
Témoin 1		95.82	0.78	21.51	0.07	0	0	0	0.24	0	0.24	118.18	118.42
Témoin 2		93.38	0.78	20.80	0.06	0	0	0	0.12	0	0.12	115.02	115.14
Moyenne témoins		94.60	0.78	21.16	0.07	0	0	0	0.18	0	0.18	116.60	116.78

Echantillons Vermiculite Esp.
CEC lère et 2ème extraction meq/g d'ech. sec

P: incubation hivernale

A : incubation annuelle

ECHANTILLONS	Fe	Al
1 Balme (P) A ₂	0.015	0.021
2 " (P) Bs	0.018	0.052
3 Lognan (P) Ao	0.014	0.038
4 " (P) A ₂	0.015	0.038
5 " (P) Bs	0.025	0.140
6 Lavancher (P) Ao	0.013	0.037
7 " (P) A ₁	0.014	0.015
8 Nivose (P) A ₁	0.013	0.021
9 " (P) Bh	-	-
10 Balme (A) A ₂	0.020	0.078
11 Lognan (A) Ao	0.024	0.102
12 " (A) A ₂	0.021	0.069
13 " (A) Bs	0.063	0.208
14 Lavancher (A) Ao	0.013	0.003
15 " (A) A ₁	0.015	0.015
16 " (A) (B)	-	-
17 " (A) (B)	0.010	0.027
18 Nivose (A) A ₁	0.016	0.033
19 " (A) Bh	0.020	0.081
T V ₁	0.011	0.033
T V ₂	0.014	0.009
Moyenne des témoins	0.013	0.021

Echantillons Vermiculite Esp. Extractions méthode Tamura
résultats en g/100g

NIVOSÉ

BALNE

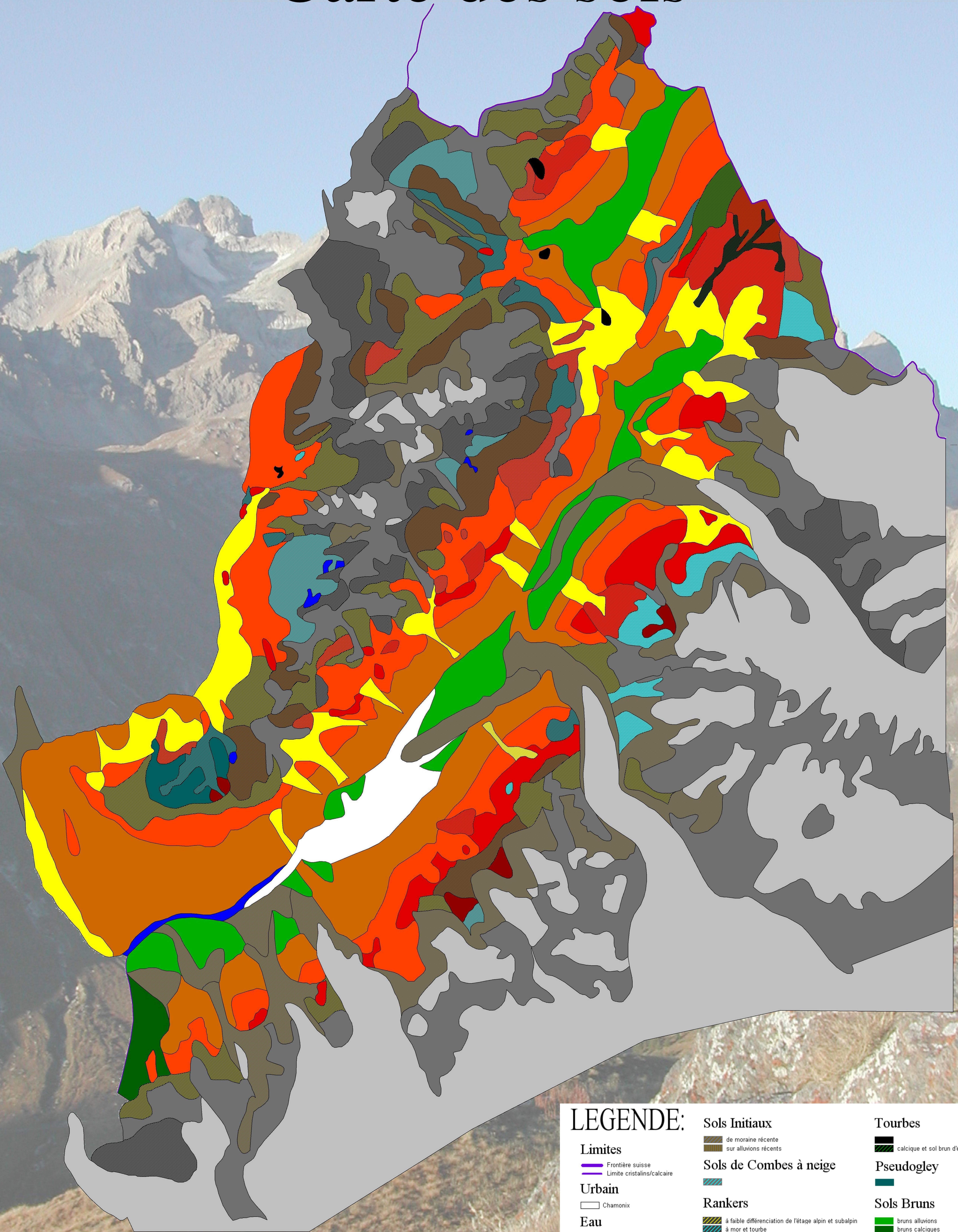
LOGNAN

LARAWCNER



CHAMONIX

Carte des sols



LEGENDE:

Limites

- Frontière suisse
- Limite cristallins/calcaire

Urbain

- Chamonix

Eau

-

Roches nues

-

Glaciers

-

Lithosols

- avec roche
- calcaire

Sols Initiaux

- de moraine récente
- sur alluvions récents

Sols de Combes à neige

-

Rankers

- à faible différenciation de l'étage alpin et subalpin
- à mor et tourbe
- cryptopodzoliques et podzoliques

Sols Podzolisés

- podzol
- podzol alpin
- sur calcschistes
- lithosol et ocre podzologique sur calcaire
- ocre podzologique
- ocre podzologique humifère
- remanié
- stagnogley podzologique alpin et subalpin

Tourbes

- calcaire et sol brun d'érosion

Pseudogley

-

Sols Bruns

- bruns alluvions
- bruns calcaires
- bruns colluvions
- bruns ocreux et acides